

TESIS DE DOCTORADO

ADQUISICIÓN, EVALUACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS DATOS DE OLEAJE ESTIMADOS POR LOS RADARES HF DE LA COSTA GALLEGA.

Ana M^a Basañez Mercader

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE
COMPOSTELA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS, TECNOLOGÍA Y GESTIÓN

SANTIAGO DE COMPOSTELA

2021





DECLARACIÓN DEL AUTOR DE LA TESIS

**Adquisición, evaluación y aplicación de los datos de oleaje
estimados por los radares HF de la costa gallega.**

Dña. Ana Mª Basañez Mercader

Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento, y declaro que:

- 1) *La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.*
- 2) *En su caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.*
- 3) *La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide con la versión enviada en formato electrónico.*
- 4) *Confirmo que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mí para la obtención de otros títulos.*

En Santiago, de de 20

Fdo. Ana Mª Basañez Mercader



AUTORIZACIÓN DO DIRECTOR / TITOR DA TESE

**Adquisición, evaluación y aplicación de los datos de
oleaje estimados por los radares HF de la costa
gallega.**

D. Vicente Pérez Muñuzuri
D. Jose Luis Sánchez López

INFORMA/N:

Que a presente tese, correspóndese co traballo realizado por Dna. Ana M^a Basañez Mercader, baixo a miña dirección/titorización, e autorizo a súa presentación, considerando que reúne os requisitos esixidos no Regulamento de Estudos de Doutoramento da USC, e que como director desta non incorre nas causas de abstención establecidas na Lei 40/2015.

De acordo co indicado no Regulamento de Estudos de Doutoramento, declara tamén que a presente tese de doutoramento é idónea para ser defendida en base á modalidade de Monográfica con reprodución de publicacións, nos que a participación da doutoranda foi decisiva para a súa elaboración e as publicacións se axustan ao Plan de Investigación.

En, de de 20....



A Gus, Arco y Wendy

A mi familia

El origen y el final





Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XVII
Abreviaturas	XXI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	9
3. MÉTODOS	11
3.1. Área de estudio	11
3.2. Análisis del oleaje	14
3.2.1. Radares HF Seasonde	20
3.3. Disponibilidad y tratamiento de datos	24
3.4. Matrices de energía y producción de un WEC	27
4. VALIDACIÓN DATOS DE OLEAJE	29
4.1. Procesado de los datos de los radares	30
4.2. Descripción del oleaje con las fuentes de datos	34
4.2.1. Pérdida de datos de los radares	45
4.3. Validación entre las fuentes de datos	50

4.4.	Validación con las boyas	51
4.4.1.	Validación por RCs	51
4.4.2.	Validación de los parámetros del oleaje	53
4.4.3.	Validación por WR en Vilán	60
4.4.4.	Validación por WR en Silheiro	71
4.5.	Análisis de discrepancias significativas	80
4.6.	Tiempo de procesado del espectro de los radares	87
4.7.	Modificación de los límites de costa	90
4.8.	Discusión	94
5.	EVALUACIÓN DEL RECURSO UNDIMOTRIZ	101
5.1.	Validación estadística de la potencia undimotriz	104
5.2.	Descripción del recurso undimotriz	110
5.3.	Producción eléctrica de un WEC	118
5.4.	Completar series de datos de boyas con datos de radares	120
5.5.	Discusión	122
CONCLUSIONES		125
ANEXO. Fuentes de datos		129
A.1.	Radares HF	129
A.2.	Boyas	131
A.3.	Puntos SIMAR	132
A.4.	Modelo WaveWatch III	132
A.5.	Estación meteorológica de Camariñas	133
Bibliografía		135
Listado de publicaciones		151

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi director Vicente Pérez Muñuzuri el haberme dado la oportunidad de realizar esta Tesis y su apoyo durante estos años. También el haber hecho posible la participación en los proyectos que la han sustentado: MyCOAST (Interreg Atlantic Area) y RADARONRARIA (POCTEP) financiados por la Unión Europea. En segundo lugar, agradezco a los miembros del comité de seguimiento, Silvia Piedracoba y Joaquim Dias, el interés mostrado en mi trabajo y por sus preguntas y comentarios siempre constructivos.

Al personal de Puertos del Estado, Intecmar, Meteogalicia y Qualitas Instruments por el soporte técnico y humano, en especial a Pablo Lorente, Pilar Gil, Pedro Montero, Pablo Carracedo y Juan C. Galeano. Quiero también agradecer al Instituto Hidrográfico de Portugal el acogimiento para realizar la estadia de investigación, gracias en especial a Carlos Fernández y Teotónio Pires.

Gracias a mis compañeros del GFNL, cerca o lejos han sido un gran apoyo. Gracias Sara por siempre estar ahí, gracias a Dani y Darío por la ayuda durante todos estos años y en la recta final.

Gracias a mi familia y a todos aquellos que tuvieron que soportarme en los malos momentos. A Luis y Marta, amigos que hacen que todo sea posible.



Resumen

Los radares de alta frecuencia son herramientas útiles para la medición de corrientes y oleaje oceánico, con una amplia resolución espacial y temporal. Sin embargo, su eficiencia está todavía en estudio. En esta Tesis el trabajo se ha centrado en la evaluación de los datos de oleaje producidos por dos radares Seasonde de CODAR con frecuencia de trabajo de 4,86 MHz, ubicados en los faros de Cabo Vilán y Cabo Silleiro, en la costa oeste de Galicia (España). En primer lugar, se ha evaluado la abundancia y calidad de los parámetros espectrales del oleaje generados por los radares frente a los datos de dos boyas próximas (Vilano-Sisargas y Silleiro) y de puntos del modelo SIMAR (Simulación MARina). Con un enfoque basado en las condiciones oceanográficas y geográficas de la zona de estudio, se han podido concretar las condiciones de oleaje mejor descritas por los radares, así como aquellas que quedan fuera de su rango de medición. También ha permitido relacionar muchas de las discrepancias entre los datos de radares y boyas con estados de mar complejos, que no son bien representados por los parámetros espectrales. En general, la correlación de la altura significativa espectral del oleaje (H_{m0}) de radares y boyas es significativa, algo menor entre el periodo centroide de los radares y el pico de las boyas, y se describieron diferencias significativas respecto a la dirección media del oleaje. En base a los resultados, también se ha comprobado que la reducción del tiempo de procesado del espectro por parte de los radares no produce una disminución significativa en la calidad de los datos.

En segundo lugar, considerando la importancia del desarrollo de las energías renovables marinas y su dependencia de la evaluación

del recurso undimotriz, se ha analizado la aplicación de los datos de oleaje generados por los radares con este fin. En primer lugar, se llevó a cabo una validación estadística de la potencia del oleaje calculada con las muestras disponibles y a continuación se describió el recurso undimotriz en términos anuales y estacionales, incluyendo la incidencia de la falta de datos de los radares, mediante el cálculo de matrices de energía, la energía media y rosas de potencia de oleaje. Además, el resultado de esta descripción se aplicó en la estimación de la energía producida por dispositivos de aprovechamiento de la energía de las olas (WECs). Se ha observado que los radares, debido a la sobreestimación del periodo energético y en menor grado de la H_{m0} , sobreestiman la potencia neta del oleaje. Sin embargo, el radar de Vilán infraestima la energía undimotriz disponible por el elevado porcentaje de datos nulos de sus datos. Ambos factores tuvieron también una gran incidencia en la estimación de la energía producida por los WECs. Por otro lado, se ha comparado la variabilidad espacial de la energía descrita por los radares a lo largo de sus arcos de medición con la calculada con el modelo WaveWatch III, detectándose que el radar de Cabo Vilán describe una mayor variabilidad. Finalmente se comprobó la ventaja de completar los datos de la boya de Vilán con los del radar durante periodos de oleaje muy energético.

Índice de figuras

3.1. Área de estudio con la ubicación de las fuentes de datos utilizadas en esta Tesis. Boya Vilano-Sisargas (VB), radar de Vilán (VILA), puntos SIMAR 3004028 (S28), 3002024 (S24), 3004020 (S20), 1044068 (S68), 3014002 (S02), boya Silleiro (SB), radar de Silleiro (SILL), y la estación meteorológica de Camariñas (CW). 10 arcos (RCs) de 5 km de ancho que segmentan el área de cobertura de los radares.	12
3.2. Serie de datos de elevación de la superficie (conjunto aleatorio de olas), fuente [97]. Los círculos definen el denominado paso por cero (ascendentes y descendentes). Las líneas verticales señalan las crestas de las olas.	16
3.3. (a) Espectro de oleaje estrecho. (b) Espectro de oleaje bimodal.	17
3.4. Espectro Doppler generado con el software del radar de Vilán (VILA) con la señal de las tres antenas receptoras. Los espectros están desplazados una ratio de 20-40 dB para su mejor visualización.	21

3.5.	Datos brutos disponibles de la estación de Camariñas (CW), el radar de Silleiro (SILL), boya Silleiro (SB), radar de Vilán (VILA) y la boya Vilano-Sisargas (VB). Huecos más relevantes: SILL : 13 octubre–11 noviembre, 2017; 8–28 abril, 2019; 28 julio, 2019–1 agosto, 2020. SB : 28 junio–23 julio, 2015; 26 agosto–6 septiembre, 2020. VILA : 1–19 agosto, 2014; 31 marzo–9 abril, 2015; mayo, 2015–enero, 2018; 18–24 mayo, 2018; 20 mayo–1 junio, 2019; 17 junio–30 agosto, 2019. VB : 17 enero–20 febrero, 2014; 21 abril–22 julio, 2015; 23 diciembre, 2015–09 marzo, 2016; 20 febrero–7 abril, 2019.	25
4.1.	Series de H_{m0} del RC 25 km de VILA procesado en el radar (R6, azul, $R(H_{m0}) = 0,75$ [49]), VILA RC 25 km reprocesado (R7, rojo, $R(H_{m0}) = 0,88$) y de VB (negro).	31
4.2.	Series de H_{m0} del RC 25 km de SILL procesado en el radar (R6, azul), SILL RC 25 km reprocesado (R7, rojo) y de SB (negro).	31
4.3.	Costa noroeste de Galicia. Representación de los datos emparejados de las distintas fuentes del periodo enero 2014 - abril 2015. Arcos con color: RC 10 km de los radares. Rosas de oleaje: VB : boya Vilano-Sisargas; VILA : radar de Vilán -datos correspondientes al RC 10 km-; S24 : punto SIMAR 3002024; S20 : punto SIMAR 3004020; SB : Boya Silleiro; SILL : RC 10 km del radar de Silleiro; S02 : punto SIMAR 3014002. Rosas de viento: CW : estación meteorológica de Camariñas; VBW : viento de VB; SBW : Viento de SB. Líneas negras junto a los radares marcan los límites de costa (CL) de los radares.	35
4.4.	Viento descrito por VB cuando el oleaje es NNE (a), ONO (c) y SO (e) . Viento descrito por SB cuando el oleaje medio es N (b), ONO (d) y SSO (f).	37

4.5. Diagramas de dispersión de H_{m0} (a), T_p (b) y T_m (c) de VB y SB. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.	38
4.6. Rosas de oleaje del periodo pico (T_p) en función de la dirección pico (D_p), de VB (a) y SB (b).	38
4.7. Histograma de D_m (a) y D_p (b) de VB (rojo) y SB (azul).	39
4.8. Histograma de D_{ap} de VB (rojo) y SB (azul).	39
4.9. Espectro de frecuencia y direccional del oleaje de la muestra de las 18:00h del 13/11/2014 de VB (a) y SB (b).	42
4.10. Espectro de frecuencia y direccional del oleaje de la muestra de las 17:00h del 11/03/2014 de VB (a) y SB (b).	44
4.11. Histogramas de H_{m0} de 6 RCs de los radares (colores) y las boyas (negro). (a) VILA y VB; (b) SILL y SB.	46
4.12. Porcentaje de datos nulos por cada celda definida por H_{m0} vs D_m de la boya, con resolución 1 m x 5°. (a) RC 10 km de VILA sobre VB; (b) RC 10 km de SILL sobre SB.	47
4.13. Porcentaje (color) de datos nulos del radar y número de muestras de cada celda definida por T_p vs H_{m0} de la boya (resolución 1 s x 1 m). (a) RC 10 km de VILA sobre VB; (b) RC 10 km de SILL sobre SB.	48
4.14. Rosas de oleaje de H_{m0} respecto a D_m . Datos emparejados limpios de VILA RC 10 km (a) y VB (b). Datos emparejados limpios de SILL RC 10 km (c) y SB (d). La flecha con dirección 330° marca el límite entre el oleaje ONO (NO) y el NNE (NE); la flecha con dirección 265° limita los oleajes SO y NO.	49

4.15. Validación de los datos de los RCs 10 km de los radares VILA (círculo-azul) y SILL (cuadrado-rojo) con VB, S24, S20, SB, VILA o SILL (HF) y S02. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m	50
4.16. Validación de los datos de los 10 RCs de VILA con VB. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) Media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m	52
4.17. Validación de los datos de los 10 RCs de SILL con SB. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) Media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m	53
4.18. Histogramas de H_{m0} de VILA (rojo) y VB (azul) (a) y SILL (rojo) y SB (azul) (c). Diagramas de dispersión de H_{m0} de VILA y VB (b) y SILL y SB (d). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.	54
4.19. Histogramas de D_m (resolución 0,5°) de VILA (rojo) y VB (azul) (a) y diagrama de dispersión de D_m de VILA y VB (b).	55
4.20. Histogramas de D_m (resolución 0,5°) de SB (azul) y los RCs 10 km (a), 30 km (c) y 50 km (e) de SILL (rojo). Diagramas de dispersión de D_m de SB y los RCs 10 km (b), 30 km (d) y 50 km (f) de SILL.	56
4.21. Distribución de T_p (a), T_m (b) y T_e (c) de VB (azul) y T_c de VILA (rojo) vs H_{m0} . Diagramas de dispersión de T_p (d), T_m (e) y T_e (f) de VB vs T_c de VILA. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.	58

4.22. Distribución de T_p (a), T_m (b) y T_e (c) de SB (azul) y T_c de SILL (rojo) vs H_{m0} . Diagramas de dispersión de T_p (d), T_m (e) y T_e (f) de SB vs T_c de SILL. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.	58
4.23. Histogramas de T_c de los radares (rojo) y T_p de las boyas (azul). (a) VILA y VB; (b) SILL y SB.	59
4.24. Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con el régimen de oleaje NE2 descrito por VILA (a), con la D_m (b) y D_p (c) de VB.	64
4.25. Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con el régimen de oleaje NE6 descrito por VILA (a), con la D_m (b) y D_p (c) de VB.	64
4.26. Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con el régimen de oleaje NE4 descrito por VILA (a), con la D_m (b) y D_p (c) de VB.	65
4.27. Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje NO2 (a-c), NO4 (d-f) y NO6 (g-i) descritos por VILA (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de VB.	66
4.28. Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje SO2 (a-c), SO4 (d-f) y SO6 (g-i) descritos por VILA (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de VB.	68
4.29. Rosas de viento con muestras coincidentes con el grupo SO de VILA de la estación de Camariñas (CW) (a) y el viento proporcionado por VB (VBW) (b).	69
4.30. Viento coincidente con el grupo SO de VILA, cuando VB estima D_m y D_p entre 290°-90°. (a) Estación de Camariñas (CW); (b) Viento proporcionado por VB (VBW).	70
4.31. Representación de las muestras correspondientes a la saturación en 221° de VILA. Rosas de viento de la estación de Camariñas (CW) (a) y del viento proporcionado por VB (VBW) (b). Rosa de oleaje de D_m de VB (c).	71

4.32. Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje NE2 (a-c), NE4 (d-f) y NE6 (g-i) descritos por SILL (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de SB.	74
4.33. Muestras correspondientes a la saturación en 350° de SILL. Rosa de viento de SB (a) y rosa de oleaje de D_m de SB (b).	75
4.34. Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje NO2 (a-c), NO4 (d-f) y NO6 (g-i) descritos por SILL (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de SB.	76
4.35. Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje SO2 (a-c), SO4 (d-f) y SO6 (g-i) descritos por SILL (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de SB.	78
4.36. Rosa de los vientos de SB con muestras coincidentes con el grupo SO de SILL (a) y cuando, además, D_m y D_p de SB se sitúan entre 290°-90° (b).	79
4.37. Representación de las muestras de SB correspondientes a la saturación en 180° de SILL. Rosa de viento (a) y rosa de oleaje en función de D_m (b).	79
4.38. Datos en rojo, correspondientes a las 111 muestras del RC 10 km de VILA que infraestiman el valor de T_p de VB, representados sobre el diagrama de dispersión de T_p vs T_c (a) y el diagrama de dispersión de H_{m0} (b). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos. Representación de los 111 espectros de VB que corresponden a los datos marcados en rojo (c). . .	80
4.39. Datos en rojo, correspondientes a las 63 muestras del RC 10 km de SILL que infraestiman el valor de T_p de SB, representados sobre el diagrama de dispersión de T_p vs T_c (a) y el diagrama de dispersión de H_{m0} (b). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos. Representación de los 63 espectros de SB que corresponden a los datos marcados en rojo (c).	81

4.40. Datos en rojo correspondientes a las 105 muestras de SILL que sobreestiman el valor de T_p de SB representados sobre el diagrama de dispersión de T_p vs T_c (a) y el diagrama de dispersión de H_{m0} (b). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos. Representación de los 105 espectros de SB que corresponden a los datos marcados en rojo (c). Ejemplo del espectro generado por SB para uno de los casos (4/04/2014, 7 h) (d).	82
4.41. Representación de los MAPEs de H_{m0} entre VILA y VB, para cada combinación H_{m0} vs D_m de los datos de VILA (resolución 1m x 5°).	84
4.42. Representación de los MAPEs de H_{m0} entre SILL y SB, para cada combinación H_{m0} vs D_m de los datos de SILL (resolución 1m x 5°).	85
4.43. Rosas de oleaje de las muestras de SILL con $180^\circ \leq D_m < 235^\circ$ y $H_{m0} \geq 5$ m (a) y las muestras correspondientes de SB (b).	85
4.44. Diagramas de dispersión de H_{m0} (a), T_c vs T_p (b) y D_m (c) del RC 10 km de VILA y VB. Los puntos rojos corresponden a los datos de la selección de muestras de VILA con $330^\circ \leq D_m < 90^\circ$ y $H_{m0} \geq 6$ m. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.	86
4.45. Diagramas de dispersión de H_{m0} (a), T_c vs T_p (b) y D_m (c) del RC 10 km de SILL y SB. Los puntos rojos corresponden a los datos de la selección de muestras de SILL con $180^\circ \leq D_m < 235^\circ$ y $H_{m0} \geq 5$ m. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.	86
4.46. Validación de los datos de los 10 RCs de VILA con reprocesado de 180' (rojo) y 120' (azul) con VB. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) Media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m	88

4.47. Validación de los datos de los 10 RCs de SILL con reprocesado de 180' (rojo) y 120' (azul) con SB. (a) R de H_{m0} ; (b) MAPE de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) MAE de D_m	88
4.48. Validación de los datos de los 9 WR del RC 10 km de VILA con reprocesado de 180' (rojo) y 120' (azul) con VB. (a) R de H_{m0} ; (b) MAPE de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) MAE de D_m . .	89
4.49. Validación de los datos de los 9 WR del RC 10 km de SILL con reprocesado de 180' (rojo) y 120' (azul) con SB. (a) R de H_{m0} ; (b) MAPE de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) MAE de D_m . .	89
4.50. Entorno y zona de cobertura del radar VILA en Cabo Vilán con las líneas batimétricas. Los arcos delimitan los RCs 5 y 10 km y el total de la zona de cobertura del radar (55 km) con los límites de costa de radar (221°-41°). Las líneas rectas rojas indican los nuevos límites de costa (230°-25°). El triángulo verde representa VB.	91
4.51. Validación de los datos de los 10 RCs de las 4 configuraciones del radar VILA con los datos de VB. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) Media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m	92
4.52. Rosas de oleaje de (a) VB en función de su D_m ; (b) VILA RC 10 km; (c) VILA_230_230 RC 10 km; (d) VILA_230_221 RC 10 km; (e) VILA_230_200 RC 10 km; (f) VILA_230_200 RC 40 km.	93

5.1. Noroeste de la costa gallega con las áreas de estudio de Vilán (a) y Silheiro (b). Las fuentes de datos indicadas en la figura son la Boya Vilano-Sisargas (VB), el radar de Vilán (VILA) y sus 5 primeros RCs, los puntos SIMAR 3004028 (S28) y 1044068 (S68), la boyas Silheiro (SB), el radar de Silheiro (SILL) y sus 5 primeros RCs.	102
5.2. Diagramas de dispersión del periodo energético (T_e) de VB vs RC 10 km de VILA (a) y S28 (b). Y de SB vs RC 10 km de SILL (c) y S68 (d). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.	106
5.3. Barras superpuestas de la energía undimotriz total por año, de VILA RC 10 km (rojo), VB (azul) y S28 (verde).	107
5.4. Barras superpuestas de la energía undimotriz total por estación del año, de VILA RC 10 km (rojo), VB (azul) y S28 (verde). Sp: primavera; Su: verano; Au: otoño; Wi: invierno.	108
5.5. Barras superpuestas de la energía undimotriz total por año, de SILL RC 10 km (rojo), SB (azul) y S68 (verde).	109
5.6. Barras superpuestas de la energía undimotriz total por estación del año, de SILL RC 10 km (rojo), SB (azul) y S68 (verde). Sp: primavera; Su: verano; Au: otoño; Wi: invierno.	110
5.7. Matrices de energía de S28 (a), VILA RC 10 km (b) y VB (c). Los números y colores son porcentaje de ocurrencia. Líneas de potencia de los percentiles 25, 50, 75, 90 y 99%.	112
5.8. Matrices de energía de S68 (a), SILL RC 10 km (b) y SB (c). Los números y colores son porcentaje de ocurrencia. Líneas de potencia de los percentiles 25, 50, 75, 90 y 99%.	113
5.9. Rosas de potencia de oleaje con datos de los veranos de S28 (a), VILA RC 10 km (b) y VB (c).	115

5.10. Rosas de potencia de oleaje con datos de los veranos de S68 (a), SILL RC 10 km (b) y SB (c).	115
5.11. Energía media anual (a, f) y por estación de la zona de Vilán: primavera (b,g), verano (c,h), otoño (d,i) e invierno (e,j). Fondo con los datos de WW3. S28 y VB representados con un círculo. Los arcos negros corresponden a los 5 RCs de VILA, pero solo se muestran sus datos de Em en la línea inferior (f-j). . .	116
5.12. Energía media anual (a, f) y por estación de la zona de Silleiro: primavera (b,g), verano (c,h), otoño (d,i) e invierno (e,j). Fondo con los datos de WW3. S68 y SB representados con un círculo. Los arcos negros corresponden a los 5 RCs de SILL, pero solo se muestran sus datos de Em en la línea inferior (f-j). . .	117
5.13. Matrices de potencia de los WECs Pelamis (a): potencia por cada combinación de T_e vs H_{m0} (resolución 0,5 s x 0,5 m) y Aquabuoy (b): potencia por cada combinación de T_p vs H_{m0} (resolución 1 s x 0,5 m).	119

Índice de tablas

3.1.	Resumen del procedimiento de cribado de datos con el método del CMEMS [103] y las modificaciones aplicadas.	26
4.1.	Numero de muestras del radar y boya de las zonas de Vilán (a) y Silleiro (b). Muestras teóricas: número ideal de muestras cada hora de las boyas (VB y SB) y cada 30 minutos de cada arco (RC) de los radares (VILA y SILL) del periodo de tiempo analizado: 01/01/2014 – 30/04/2015. Muestras disponibles: total de muestras disponibles de cada serie de datos. % huecos: porcentaje respecto al número de muestras teóricas de los huecos encontrados en las series de datos. % nulos: porcentaje de muestras marcadas como nulos por el software de los radares. Fallos: número de muestras marcadas como fallos según el cribado diseñado para este trabajo (Tabla 3.1). Muestras limpias: muestras válidas de cada serie de datos. . . .	32
4.2.	Muestras válidas de boyas y puntos SIMAR. Muestras válidas (horarias) de cada RC de VILA y SILL utilizadas para la validación estadística. Muestras correspondientes al periodo comprendido entre enero 2014 y abril de 2015.	33
4.3.	Parámetros espectrales de la muestra de las 18:00 h del 13/11/2014 de VB y VILA (a) y de SB y SILL (b). . .	42

4.4. Parámetros espectrales de la muestra de las 17:00h del 11/03/2014 de VB y VILA (a) y de SB y SILL (b). . .	44
4.5. Nueve regímenes de oleaje (WR) en los que se clasifica el oleaje descrito por VB.	60
4.6. Validación por régimen de oleaje (WR) definido por VB, de los parámetros espectrales H_{m0} , T_c vs T_p y D_m , mediante los estadísticos: índice de correlación lineal (R); Media del error absoluto porcentual (MAPE); Bias (sesgo); raíz del error cuadrático medio (RMSE); error medio absoluto (MAE). N° muestras: descripción de las muestras emparejadas disponibles antes (brutas) y después de eliminar los nulos y fallos del radar (válidas).	62
4.7. Validación por régimen de oleaje (WR) definido por VILA. N° de muestras: muestras válidas de VILA emparejadas con la boya, para cada grupo de oleaje. . .	63
4.8. Validación por régimen de oleaje (WR) definido por SB, de los parámetros espectrales H_{m0} , T_c vs T_p y D_m , mediante los estadísticos: índice de correlación lineal (R); media del error absoluto porcentual (MAPE); Bias (sesgo); raíz del error cuadrático medio (RMSE); error medio absoluto (MAE). N° de muestras: descripción de las muestras emparejadas disponibles antes (brutas) y después de eliminar los nulos y fallos del radar (válidas).	72
4.9. Validación por régimen de oleaje (WR) definido por SILL. N° de muestras: muestras válidas de SILL emparejadas con la boya, para cada grupo de oleaje. . .	73
4.10. Número de muestras cada 30 minutos y sin nulos de las series de datos procesados usando 120 y 180 minutos de VILA (a) y SILL (b).	87

5.1. Número de muestras horarias disponibles de las boyas y puntos SIMAR (VB, SB, S28, S68). Número ideal de muestras horarias para cada periodo de datos. Número de muestras cada 30' del RC 10 km de los radares (VILA, SILL) y el porcentaje correspondiente de datos nulos. El número de muestras correspondientes al modelo WW3 es igual al del número ideal de muestras horarias.	104
5.2. Muestras válidas comunes a todas las fuentes de datos de cada área.	105
5.3. Potencias medias y raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las series de datos (VB, S28 y VILA).	107
5.4. Potencias medias y raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las series de datos (SB, S68 y SILL). . .	109
5.5. Datos brutos emparejados de cada área, Vilán (a), Silheiro (b), y datos limpios correspondientes a cada fuente de datos (sin nulos ni fallos). El tamaño muestral de WW3 coincide con el de los puntos SIMAR.	111
5.6. Energía undimotriz media (E_m) anual y por estación del año en las zonas de Vilán (a) y Silheiro (b) . Los datos de los radares corresponden a los RCs 10 km.	114
5.7. Coeficientes de variabilidad (CoV) de la energía media (E_m) y la potencia (P) undimotriz.	118
5.8. Producción de electricidad anual y estacional de Pelamis y Aquabuoy en base al recurso descrito por las tres fuentes de datos de las zonas de Vilán (a,c) y Silheiro (b,d). Los datos de los radares corresponden a los RCs 10 km.	120
5.9. Energía media undimotriz (E_m) anual y estacional calculada con S28, VB y el conjunto de datos resultante de completar las series de datos de VB con muestras de VILA (VB + VILA).	121

A.1. Características y limitaciones de los radares HF en función de su frecuencia de trabajo [112, 44]. Valores aproximados. 130

A.2. Coordenadas de las ubicaciones de Boya Vilano-Sisargas (VB), radar de Vilán (VILA), puntos SIMAR 3004028 (S28), 3002024 (S24), 3004020 (S20), 1044068 (S68), 3014002 (S02), boya Silleiro (SB), radar de Silleiro (SILL) y la estación meteorológica de Camariñas (CW). 133



Abreviaturas

<i>A</i>	Amplitud de onda
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
CL	Límites de costa
CMEMS	The Copernicus Marine Service
<i>CoV</i>	Coefficiente de Variabilidad
CW	Estación meteorológica de Camariñas
<i>D_a</i>	Dispersión angular
<i>D_{ap}</i>	Dispersión angular en el pico de energía del espectro
<i>D_m</i>	Dirección media espectral
<i>D_p</i>	Dirección pico espectral
EA	Patrón del Atlántico Este
<i>Em</i>	Energía undimotriz media
GFS	Global Forecast System
HF	High-Frequency / alta frecuencia
<i>H_{1/3-1/2}</i>	Alturas significativas
<i>H_z</i>	Altura media cruce por cero
<i>H_{m0}</i>	Altura significativa espectral
HIRLAM	High Resolution Local Area Modelling
λ	Longitud de onda
MAE	Error medio absoluto
MAPE	Media del error absoluto porcentual
NAO	Oscilación del Atlántico Norte
<i>P</i>	Potencia undimotriz
PSD	Densidad espectral de la energía
PdE	Puertos del Estado

Abreviaturas

R	Índice de correlación lineal
RC	Arco del radar
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
S24	Punto SIMAR 3002024
S20	Punto SIMAR 3004020
S02	Punto SIMAR 3014002
S28	Punto SIMAR 3004028
S68	Punto SIMAR 1044068
SB	Boya Silleiro
SBW	Viento de la boya Silleiro
SILL	Radar de Cabo Silleiro
SIMAR	SImulación MARina
SWAN	Simulating Waves Nearshore
T_c	Periodo centroide
T_e	Periodo energético
T_m	Periodo medio espectral
T_p	Periodo pico espectral
TRF	Transformación Rápida de Fourier
VB	Boya Vilano-Sisargas
VBW	Viento de la boya Vilano-Sisargas
VILA	Radar de Cabo Vilán
WAM	Wave Modelling
WANA	Waves Analysis
WB	Límites de dirección del oleaje
WEC	Dispositivo de aprovechamiento de la energía de las olas
WERA	Wellen Radar
WR	Régimen de oleaje
WW3	WaveWatch III

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Este capítulo incluye contenido de los siguientes artículos:

Basañez, A.; Lorente, P.; Montero, P.; Álvarez-Fanjul, E.; Pérez-Muñuzuri, V. Quality Assessment and Practical Interpretation of the Wave Parameters Estimated by HF Radars in NW Spain. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 598. Ed. MDPI, ISSN: 2072-4292. Coautores: Pablo Lorente (Puertos del Estado (PdE)), Pedro Montero (INTECMAR), Enrique Álvarez-Fanjul (PdE) y Vicente Pérez Muñuzuri (Universidad de Santiago de Compostela (USC)).

Basañez, A.; Pérez-Muñuzuri, V. HF Radars for Wave Energy Resource Assessment Offshore NW Spain. *Remote Sens.* **2021**, *13* (11), 2070. Ed. MDPI, ISSN: 2072-4292. Coautor: Vicente Pérez Muñuzuri (USC).

La medición y caracterización del oleaje, es uno de los grandes retos del desarrollo y seguridad de las actividades marítimas. Una de estas actividades es la explotación de la energía marina que, junto al resto de las energías renovables, será uno de los factores claves en la lucha contra la emisión de gases de efecto invernadero, la reducción de residuos, y el fomento de la generación distribuida y la diversificación del mix energético. Entre las tecnologías marinas, la

eólica, que parte de un gran desarrollo en tierra, es la más desarrollada, seguida muy de lejos por la mareomotriz y la energía undimotriz [1]. De estas dos, la undimotriz es la que ofrece una mayor posibilidad de aprovechamiento debido principalmente a la disponibilidad espacial y a una menor inversión especialmente en infraestructuras [1, 2], pero también es el recurso más complicado de describir y pronosticar [3]. En una aproximación global, a nivel mundial la potencia undimotriz disponible estaría en torno a 1.000 – 10.000 GW, por lo que en teoría por si sola satisfaría prácticamente la demanda mundial de ≈ 1.800 GW (16.000 TWh/año) [4, 5]. En el caso de la Península Ibérica, la costa noroccidental de Galicia es considerada una de las zonas con mayor recurso undimotriz, estimándose frente a Costa da Morte (aguas abiertas) 400 MWh/m anuales [6], y algo más al sur, frente a Cabo Silleiro unos 300 MWh/m [7].

El aprovechamiento de la energía undimotriz se realiza por medio de dispositivos que transforman esta energía en electricidad (o en algunos casos en energía mecánica para el bombeo de agua, etc.) denominados WECs (siglas del término en inglés Wave Energy Converters). Por el momento la mayoría de los WECs son prototipos, algunos están ya en fase de prueba en mar y muy escasos los que están en pruebas a escala comercial. Los éxitos y fracasos en este aspecto pueden encontrarse en algunos trabajos [8, 4, 9] y en informes anuales como los de OES (The Ocean Energy Systems) donde, por ejemplo, están descritos dos proyectos desarrollados en Galicia: la zona de pruebas de Punta Langosteira y la boya Gelula, que se probó en Langosteira entre 2018 -2019, dentro del proyecto LifeDemoWave [10]. Desde el punto de vista industrial, el mayor reto para los WECs es sobrevivir al medio marino, en especial la incrustación de vida marina en los dispositivos [11], y los problemas de operación y mantenimiento que se pueden dar en sus futuras ubicaciones, ya que estas habrán sido seleccionadas por su alta disponibilidad energética lo que equivale a duras condiciones climáticas y de oleaje [12]. Por supuesto, al igual que cualquier otra industria marina hay que tener en cuenta el impacto ambiental y la convivencia con otros usos como la navegación [13].

Como se ha comentado, uno de los mayores retos para

la explotación de la energía undimotriz es la estimación de la disponibilidad del propio recurso, algo imprescindible para seleccionar ubicaciones para las granjas marinas, estimar la viabilidad económica y gestionar la energía que va a ser producida por los WECs y suministrada a la red eléctrica [8, 14]. Para mayor complejidad, la exactitud en la estimación de la producción de electricidad de un WEC depende en gran medida de una precisa descripción del oleaje cualitativa y cuantitativamente [15], es decir, una estimación bruta de la energía disponible puede no representar la que será aprovechada por un WEC [16, 17, 18, 12].

La incertidumbre a la hora de estimar el recurso undimotriz tiene dos facetas: Por un lado, el método con el que se va a calcular la dirección, periodo y altura de ola que mejor defina el recurso energético. Así, se puede elegir entre analizar de forma conjunta todo el espectro del oleaje considerándolo unimodal y por tanto representativo de un estado de mar relativamente uniforme, o por el contrario considerar la posible bimodalidad o multimodalidad del espectro, y analizar de forma independiente los sistemas de olas (el mar de fondo y de viento) que lo componen [19, 20, 15]. A esto hay que añadir el grado de precisión con el que se va a describir la variabilidad temporal del recurso en la zona (mensual, estacional, anual) o si se va a definir algún umbral en los niveles de energía que van a ser analizados [7, 21, 22, 23].

El otro aspecto a tener en cuenta es cómo se obtienen los datos con los que se conforma el espectro del oleaje. El método tradicional de medición considerado por el momento el más fiable por ser una medición *in situ*, son las boyas, pero tienen ciertos inconvenientes como son lograr un correcto fondeo que evite las interferencias en las mediciones del oleaje, la posibilidad de soltarse, sufrir accidentes o vandalismo en la superficie y la dificultad de su mantenimiento durante periodos climáticos adversos. Por otro lado, las boyas realizan mediciones solo en un punto y, puesto que ocupan un espacio que compite con otros usos, no es posible su fondeo de forma masiva. En la práctica, para obtener datos de oleaje con amplia cobertura y resolución espacial, el método más extendido es la utilización de modelos numéricos, aunque generalmente siguen siendo validados y

ajustados con datos de boyas [24, 25].

En la actualidad, los modelos más desarrollados son, en el caso de aguas profundas WAM (Wave Modelling) y WaveWatch III (WW3) [26, 27, 28, 5, 29, 14], y para estimar la propagación del oleaje hacia la costa, donde cobra más relevancia la batimetría, las características de la línea de costa y la resolución, el modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore) [30, 7, 31, 32, 14]. Aunque estos modelos están en continuo desarrollo y ajuste [33, 34, 35] sus productos no son mediciones directas del oleaje y tienen cierta complejidad en su aplicación como tener en cuenta múltiples factores y particularidades de cada zona estudiada [24], así como la resolución espacial o temporal de los datos del hindcast utilizado, lo que tiene repercusión, por ejemplo, en la descripción de la variabilidad temporal del recurso [27, 36]; y en el caso de SWAN los datos finales dependerán de la selección previa de patrones de oleaje para su propagación [21, 34, 3].

Como alternativa a modelos y boyas, en la actualidad se están aplicando tecnologías de teledetección para realizar mediciones directas del oleaje con gran cobertura espacial y resolución. Por un lado, están las mediciones desde satélites por medio de altímetros en combinación con otros dispositivos. Estos, aunque tienen una buena resolución, la calidad de los datos está limitada a zonas alejadas de la costa [37, 38], las mediciones se realizan solo a cada paso del satélite, abarcando una determinada franja espacial y temporal concreta, y solo facilitan el dato de altura de ola, por lo que el periodo debe calcularse mediante algoritmos. Para estudios extensos de variabilidad del recurso undimotriz se suele recurrir a la recopilación de los datos históricos obtenidos por varios satélites [39, 40, 25, 38].

Otro sistema de teledetección son los radares oceanográficos de alta frecuencia (Radares HF). Dispositivos capaces de medir a lo largo de grandes áreas, el oleaje (altura, periodo y dirección), el viento (dirección) y la corriente superficial (velocidad y dirección). Tienen una cobertura temporal continua y resolución entre 0,5 y 10 km en función de su frecuencia [41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51]. Además, su instalación en tierra permite un fácil acceso para la recolección de datos brutos y el mantenimiento.

Para medir el oleaje, la tecnología del radar se basa en el efecto Doppler que sufre la onda emitida por el radar al rebotar en la superficie del océano, fenómeno descrito en 1955 por Crombie [52]. Posteriormente Hasselmann, Barrick y Lipa desarrollaron los fundamentos para la extracción del espectro direccional del oleaje a partir de un radar de alta frecuencia [53, 54, 55]. En un primer momento se logró relacionar los picos de primer orden de este espectro con aquellas olas con igual dirección que el haz de radar, y longitud la mitad de la longitud de la onda del radar, denominadas ‘olas Bragg’ [56, 57]. Luego se analizaron los picos de segundo orden, que circundaban los primeros, producidos por la interacción de pares de olas y se utilizaron para calcular la altura de las olas con independencia de su longitud de onda y su dirección [53, 54, 58]. Posteriormente, Lipa realizó un test con un radar de foco estrecho usando los picos de segundo orden para la estimación del espectro de oleaje [59], pero en la práctica estos radares tenían que ser muy grandes y dependían del uso de dos antenas para aumentar el foco de la señal [55]. Finalmente, se desarrollaron radares de foco ancho (Broad Beam Radars en inglés) que permitieron la generación de espectros Doppler por cada ángulo de incidencia de la señal del radar, permitiendo así la estimación del espectro direccional del oleaje en función de la frecuencia [60].

Son varios los modelos de radares HF que se han desarrollado para obtener datos de oleaje [61, 62, 63, 64] y en la actualidad los más utilizados suelen ser de dos tipos: Los que utilizan dos sistemas de varias antenas en fase, ubicados en puntos diferentes de la costa, cuyos haces barren la misma zona de la superficie oceánica, como el WERA (Wellen Radar) [64, 46]; y los constituidos por una o dos antenas (emisora y receptora) situadas a pocos metros de distancia [65, 66], como el modelo Seasonde de CODAR, instalado en varios puntos de la costa occidental de Galicia y otros puntos de la costa española [49], y que es el objeto de análisis de esta Tesis.

Aunque varios trabajos han mostrado la eficiencia de los radares para medir el oleaje [42, 67, 68, 69, 70, 49] también se han descrito algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta [71, 72]: Primero la señal del radar solo retorna a este cuando incide sobre las olas Bragg

y para que se genere un pico de segundo orden es necesario que estas olas sean moduladas por otras de periodos superiores [67]. En segundo lugar, dependiendo de la frecuencia de trabajo del radar HF existe un mínimo y máximo de la altura de ola medible [65, 73], así como un máximo en la velocidad de la corriente presente para que se puedan realizar estimaciones correctas del oleaje [65]. Por otro lado, el periodo centroide estimado por estos radares (T_c) suele tomar valores entre el periodo medio y el pico calculado por las boyas [45, 74], y el cálculo de la dirección del oleaje está condicionado a la aplicación de un factor cardioide y al cálculo de la dirección de origen de la señal [60, 65]. También, aunque al menos para el radar Seasonde de CODAR está en desarrollo un nuevo software que permitirá separar el espectro de oleaje en sus componentes [75], por el momento el ajuste de la señal para el cálculo del espectro de oleaje se basa en un modelo unimodal del estado de mar [60, 76, 77]. En el caso del Seasonde, además se asume que el área medida está en aguas profundas (sin interferencia de la costa o el fondo marino) y el oleaje es uniforme [65, 45]. Como también sucede en otros dispositivos de medida como las boyas, la medición de los radares puede verse modulada por las mareas y corrientes inerciales y subsuperficiales [78, 45, 79].

Los radares objeto de estudio de este trabajo son los de Cabo Vilán y Cabo Silleiro (Figura 3.1). Estos forman parte de la red gallega de 4 radares CODAR Seasonde que trabajan a 4,86 MHz que, de forma combinada, proporcionan información de las corrientes de la costa oeste y también recopilan datos de oleaje. Validaciones previas de los datos proporcionados por ambos, concluyeron que estos radares producen datos fiables en lo que respecta a la altura significativa espectral del oleaje (H_{m0}) [80, 49, 37], pero también, en el caso del radar de Silleiro, se mostraron problemas respecto al cálculo de T_c que podrían deberse a estados de mar bimodales [80]. Ha sido descrito que algunas diferencias en las estimaciones de H_{m0} respecto a las boyas más próximas a los radares podrían deberse a diversas condiciones oceánicas como mareas, corrientes o estados de mar bimodales, y que la discrepancia respecto a la dirección podría ser debida a la proximidad a la costa del área medida por los radares. No obstante, cada radar describió diferencias

particulares [49].

Hasta el momento, la aplicación de los radares HF para estimar el recurso undimotriz ha sido muy limitada. Con un radar OSCAR, la H_{m0} se utilizó para describir la variación de la energía en la costa de Miami [81]. Con WERA se han hecho algunas aproximaciones en la zona del WaveHub (Cornwall, UK) llegándose a describir la potencia del oleaje con una resolución espacial de ≈ 600 m [82, 77], y en la costa central de Chile, también con un radar WERA, se calculó la potencia del oleaje utilizando la H_{m0} proporcionada por el radar y un valor constante de periodo de ola basado en otros trabajos previos [83]. Con un radar Seasonde se analizó la variabilidad inter e intra-anual de la energía del oleaje en una zona de pruebas de Galway Bay (Irlanda) utilizado únicamente la H_{m0} proporcionada por el radar. [22].

Finalmente, el trabajo realizado en esta Tesis doctoral se ha centrado en dos grandes objetivos (descritos más pormenorizadamente en la sección siguiente); de una parte, el análisis y validación estadística de los datos de oleaje obtenidos con los radares HF gallegos y de otra parte el análisis de los mismos para su uso como fuente de datos en la descripción de la energía undimotriz.



Capítulo 2

OBJETIVOS

Los radares HF son un recurso de medición directa del oleaje de gran potencial por su amplia cobertura espacial y temporal. Además, su instalación en tierra permite un fácil acceso para el mantenimiento y extracción de datos. Por tanto, consideramos que los radares HF podrían ser una herramienta de información muy útil para diversos usuarios finales como el sector de la navegación comercial y recreativa, el sector pesquero, el uso académico, como referencia para validar modelos numéricos, y especialmente para ayudar al desarrollo de las energías renovables marinas.

Sin embargo, esta aplicación de los radares HF aún está en desarrollo y bajo procesos de validación y estudio. Además, como se ha descrito, tienen ciertas limitaciones muy dependientes del estado del mar, por lo que su operatividad dependerá mucho de las características de la zona en la que estén ubicados. Por esto, en este trabajo se busca analizar de forma pormenorizada la viabilidad de los datos de oleaje generados por dos radares de la costa gallega, los instalados en Cabo Vilán y Cabo Silleiro, con un enfoque basado en las condiciones climáticas y oceanográficas de dichas zonas. Así, los objetivos principales de esta Tesis son:

- Identificar las limitaciones básicas de los dos radares.
- Analizar la cantidad y calidad de los datos de oleaje generados por

Capítulo 2. OBJETIVOS

los radares, así como su alcance espacial y temporal.

- Identificar la correlación e incidencia de las características climatológicas y del oleaje de la zona en la abundancia y calidad de los datos de los dos radares.
- Validar la aplicación de los datos de oleaje de los dos radares en la evaluación del recurso undimotriz.



Capítulo 3

MÉTODOS

Este capítulo incluye contenido de los siguientes artículos:

Basañez, A.; Lorente, P.; Montero, P.; Álvarez-Fanjul, E.; Pérez-Muñuzuri, V. Quality Assessment and Practical Interpretation of the Wave Parameters Estimated by HF Radars in NW Spain. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 598. Ed. MDPI, ISSN: 2072-4292. Coautores: Pablo Lorente (Puertos del Estado (PdE)), Pedro Montero (INTECMAR), Enrique Álvarez-Fanjul (PdE) y Vicente Pérez Muñuzuri (Universidad de Santiago de Compostela (USC)).

Basañez, A.; Pérez-Muñuzuri, V. HF Radars for Wave Energy Resource Assessment Offshore NW Spain. *Remote Sens.* **2021**, *13* (11), 2070. Ed. MDPI, ISSN: 2072-4292. Coautor: Vicente Pérez Muñuzuri (USC).

3.1. Área de estudio

La Figura 3.1 muestra la zona geográfica en la que se centra esta Tesis. Abarca la costa oeste de Galicia (España) comprendida entre los 43,55° N y 41,75° N de Latitud y penetra en el mar algo más lejos de la posición de boya Silleiro (SB), aproximadamente hasta los 9,6° O de longitud, a unos 70 km de Cabo Silleiro y 60 km de Cabo Vilán.

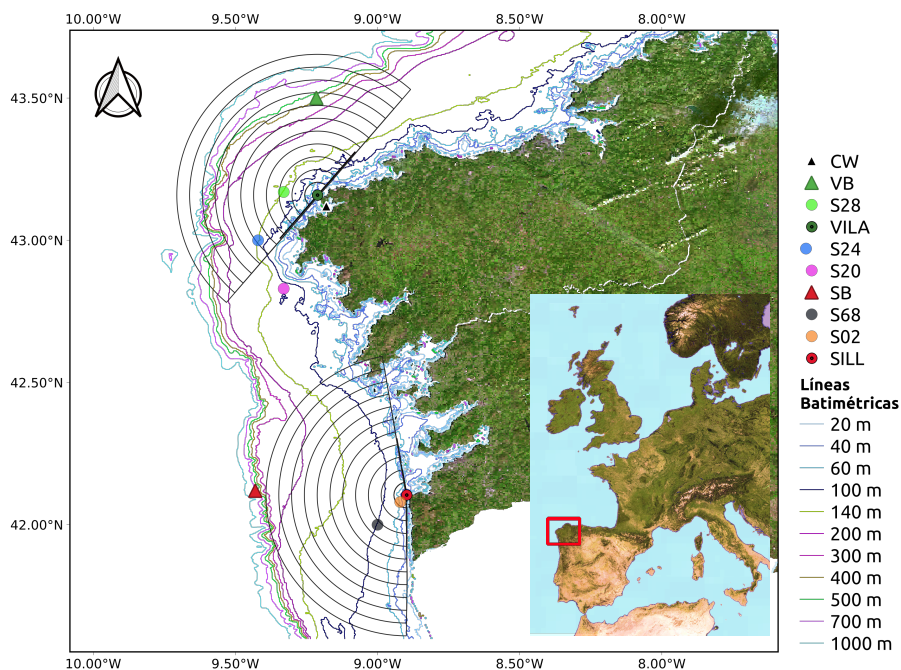


Figura 3.1: Área de estudio con la ubicación de las fuentes de datos utilizadas en esta Tesis. Boya Vilano-Sisargas (VB), radar de Vilán (VILA), puntos SIMAR 3004028 (S28), 3002024 (S24), 3004020 (S20), 1044068 (S68), 3014002 (S02), boya Silleiro (SB), radar de Silleiro (SILL), y la estación meteorológica de Camariñas (CW). 10 arcos (RCs) de 5 km de ancho que segmentan el área de cobertura de los radares.

Esta área incluye las zonas de cobertura de los radares VILA y SILL ubicados respectivamente en los faros de Cabo Vilán y Cabo Silleiro. El alcance seleccionado para los radares llega hasta los 55 km (último arco), aunque el real es mayor pero solo para obtener datos de corrientes. La costa que separa ambos radares tiene orientación prácticamente norte-sur, hasta poco antes de Cabo Vilán, que cambia a una orientación este-oeste y más al norte, a partir del Cabo Estaca de Bares, comienza la costa norte gallega bañada por el Mar Cantábrico. La batimetría, hasta los 36 km en la zona de Vilán y 54 km en la de Silleiro, abarca profundidades entre 20 y 300 m, después termina la plataforma

continental y la profundidad aumenta rápidamente hasta los 1.000 m.

El oleaje del área de estudio está muy condicionado por sistemas de bajas presiones del Atlántico de dos formas, por un lado, desde la distancia generan olas que llegan como mar de fondo a las costas gallegas y, por otro lado, cuando alcanzan la península generan tormentas y fuertes estados de mar [49]. La incidencia de estas borrascas tiene una fuerte estacionalidad, condicionada principalmente por las características climatológicas a meso escala de la zona, que a su vez genera su propio régimen de vientos y por tanto de oleaje. Así, esta se encuentra en la sección norte (Oeste Ibérico) del denominado Ecosistema de Afloramiento Canario (CUE, en sus siglas en inglés) [84], situada en una zona intermedia entre las zonas de aire polar al norte y subtropical por el sur. Esto se traduce en ser una zona de influencia de una baja presión en el norte denominada baja de Islandia y del anticiclón de las Azores. Las oscilaciones en la posición (especialmente la latitud) de estas a lo largo del año dan lugar a cierta periodicidad en la dirección del viento que discurre de forma paralela a la costa peninsular. En verano, este es mayoritariamente de norte a sur debido a la posición del anticiclón al NO de la Península Ibérica y la pérdida de fuerza de la baja de Islandia, lo que a su vez confina la circulación de los frentes atlánticos hacia latitudes más altas. En invierno el anticiclón pierde algo de fuerza y se desplaza hacia el SO de la península, siendo más frecuente el viento del sur, y la baja de Islandia avanza hacia el sur lo que permite la circulación de borrascas sobre el norte de la Península Ibérica [85, 86]. Las diferencias de presión que se dan entre la baja de Islandia y el anticiclón se representan por un índice denominado NAO (Oscilación del Atlántico Norte). Las oscilaciones de este índice inducen, por tanto, la variación en la actividad de las borrascas, teniendo una fuerte correlación con el incremento de la altura de oleaje invernal [87, 31, 49, 88]. Respecto a esto, es reseñable que en las últimas décadas se ha detectado un incremento en la altura del oleaje en el Atlántico Norte [89, 29, 90], y también de la tendencia positiva de la NAO que algunos autores consideran podría estar relacionado con el cambio climático [91, 92, 93]. El área de estudio, también se ve afectado por el Patrón del Atlántico Este (EA), y algunos estudios indican que su

evolución temporal es la opuesta a la de la NAO [88].

El ANEXO recoge una descripción de los sistemas de medición y fuentes de datos disponibles que proporcionan datos meteorológicos y oceánicos del área de estudio. En la Figura 3.1 se encuentran ubicadas las fuentes de datos utilizadas en esta Tesis que son dos boyas (VB y SB), datos de reanálisis de cinco puntos SIMAR (SIMulación MARina), la estación meteorológica de Camariñas (CW) y los dos radares VILA y SILL. También se han utilizado datos de reanálisis del modelo WaveWatch III (WW3), cuya cobertura espacial abarca toda el área de estudio.

3.2. Análisis del oleaje

Las olas oceánicas son perturbaciones o deformaciones que se producen en su superficie como consecuencia de los movimientos orbitales de las partículas. Estos son perpendiculares a la superficie, dando lugar a una onda transversal, que transmite el movimiento de una partícula a otra sin un desplazamiento neto de la materia.

Para su análisis, las olas oceánicas son consideradas ondas armónicas, y entre otros se describen con los siguientes parámetros:

- Periodo de ola (T) = tiempo en segundos que transcurre entre dos crestas de ola.
- Frecuencia (f) = $1/T$ (Hz).
- Longitud de ola (λ) = longitud entre dos crestas de ola (m).
- Celeridad (v) = velocidad de transmisión de la ola; λ/T (m/s).
- Amplitud (A) = distancia entre el nivel o elevación media de la superficie y la cresta de la ola (m).
- Altura de ola (H) = $2A$ o la distancia entre el valle y la cresta de la ola.
- Frecuencia angular (ω) = $2\pi/T$ (rad/s).

- Número de onda (κ) = $2\pi/\lambda(m^{-1})$.
- Pendiente de la onda (P_e) = H/λ

Según los factores que provocan el movimiento de las partículas, se producen distintos tipos de olas que, a su vez, se distinguen principalmente por tener distintos rangos de T . En esta Tesis se estudian las denominadas olas de gravedad u olas de forzamiento meteorológico. Estas olas son producidas por la fuerza del viento y la fuerza compensatoria de la gravedad, cuya T toma valores entre 1 y 30 s, y H no suele superar los 34 m [94, 95].

Para la formación del oleaje el viento debe incidir durante cierto periodo de tiempo y espacio (alcance del viento, o fetch término adoptado del inglés) en la superficie del océano. El oleaje generado en la zona de incidencia del viento se denomina oleaje de viento o local y suele estar formado por olas con gran diversidad de valores de T y altura de ola (H), así como una elevada pendiente. El oleaje que alcanza largas distancias desde el lugar de formación se denomina mar de fondo, y suele estar caracterizado por olas con valores de T más elevados y menos variados, así como una menor pendiente (P_e) [95].

Entre otros factores, los parámetros de las olas pueden verse afectados cuando estas interaccionan con el fondo marino (siguiendo la Teoría de la dispersión), o con la costa u otros obstáculos [96]. En base a esto podemos distinguir entre:

- Aguas abiertas y profundas: aquellas en las que el oleaje no tiene contacto con la costa u otras estructuras que pudieran generar difracción, ni tampoco con el fondo al cumplirse que la profundidad (d) es $> \lambda/2$.
- Aguas intermedias y someras: aquellas en las que $d < \lambda/2$, y se produce la interacción de la ola con el fondo marino dando lugar a los fenómenos de refracción (cambio en la dirección de la ola) y asomeramiento (cambio en la altura, shoaling en su término en inglés). Dependiendo de la forma de la línea de costa también se puede dar entre otros, la difracción de la ola.

En la práctica, el oleaje está compuesto por varias olas simultáneas que interaccionan entre sí produciéndose una superposición de ondas armónicas, que dan lugar a una onda de fase aleatoria (Figura 3.2). Esto complica la descripción del oleaje, y según las necesidades o prioridades se puede abarcar de distintas formas. Así, por ejemplo, en el caso de usos en los que la seguridad es importante, se da prioridad a la detección o cálculo de la H máxima, o también considerando que el oleaje tiene una distribución aleatoria, se calcula la denominada altura de ola significativa ($H_{1/3}$), que es la media del tercio de los valores más elevados de H , también suele utilizarse la versión $H_{1/10}$. Otro método es el denominado cruce por cero que calcula la altura de ola como la distancia entre la altura máxima y la mínima medida entre dos pasos ascendentes (o dos descendentes) por la elevación media de la superficie (Figura 3.2), y la H_z (o H media) será el valor medio de estas [94, 97, 96].

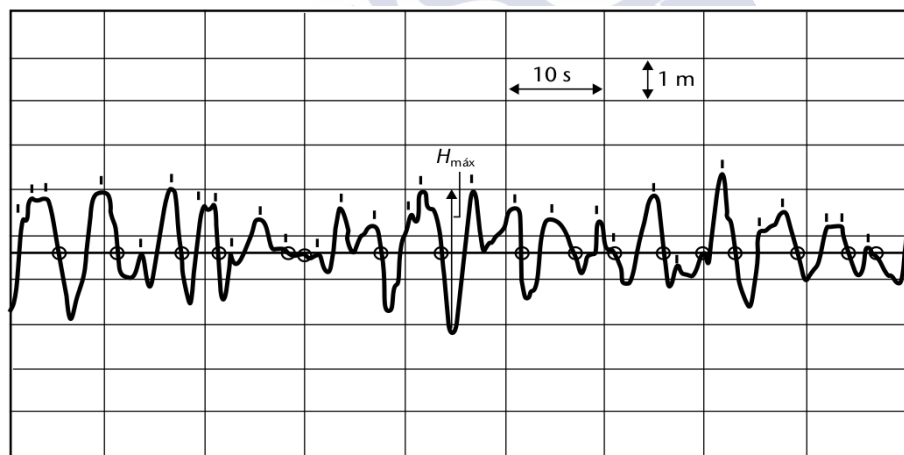


Figura 3.2: Serie de datos de elevación de la superficie (conjunto aleatorio de olas), fuente [97]. Los círculos definen el denominado paso por cero (ascendentes y descendentes). Las líneas verticales señalan las crestas de las olas.

Otra forma de describir el oleaje, y el aplicado en las fuentes de datos de esta Tesis, es representando la suma de la energía de las olas que lo componen en función de su frecuencia, conformando lo que

se denomina espectro de frecuencia del oleaje. Para esto, en primer lugar se realiza un análisis armónico o de Fourier que descompone el oleaje medido (Figura 3.2) en cada ola que lo compone en función de su frecuencia, amplitud, fase y dirección. Después, el método más habitual para generar el espectro a partir de este conjunto de olas armónicas es la transformación rápida de Fourier (TRF). El resultado es la representación de la densidad de la energía de las olas por frecuencia (PSD). Por convenio y simplificación, esta energía es calculada como la varianza de la elevación o amplitud ($\sum A^2, m^2/Hz$) [97, 96].

Esta representación, en ocasiones, toma formas muy diversas dando una idea del estado de mar analizado. Así, cuando este está compuesto principalmente por un oleaje uniforme con poca variedad de periodos (frecuencias), como un mar de fondo, el espectro tenderá a ser energético y muy estrecho (Figura 3.3(a)), si por el contrario está constituido por dos o más sistemas de olas con frecuencias y energía muy diferentes se produce un espectro con varios picos, lo que se denomina espectro bi o multimodal (Figura 3.3(b)). Un tipo de oleaje intermedio entre estos sería aquel con la energía repartida en un amplio rango de frecuencias, cuyo espectro se asemejaría a una distribución gaussiana con una amplia desviación típica.

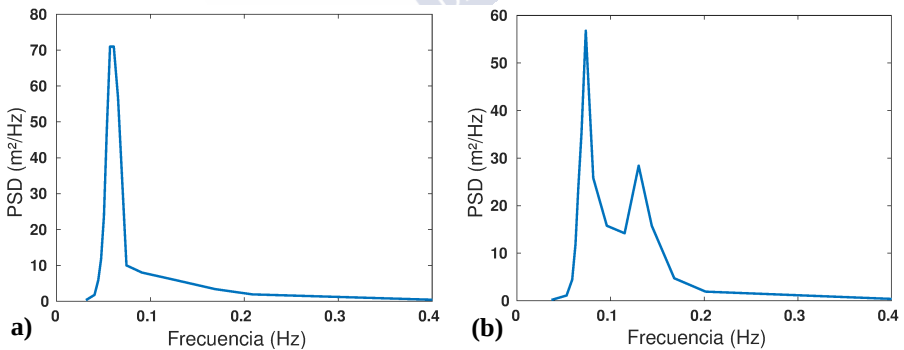


Figura 3.3: (a) Espectro de oleaje estrecho. (b) Espectro de oleaje bimodal.

Cuando el dispositivo de medida aporta la información suficiente también se puede componer el espectro direccional completo. Este es bidimensional y describe la energía en base a la frecuencia y

direcciones predominantes de las olas. Cuando los datos disponibles no son lo suficientemente completos o detallados, se recurre al uso de modelos de espectro para poder estimar el espectro del oleaje medido. Estos modelos se suelen elegir en función de la zona geográfica, la profundidad y otros factores. Uno de ellos es el de Pierson-Moskowitz, utilizado por los radares HF, que representa un estado de mar de viento completamente desarrollado [97].

A partir del espectro de oleaje se obtienen los parámetros espectrales del oleaje, en concreto su cálculo se basa en los momentos espectrales definidos por la siguiente ecuación [97]:

$$m_n = \int f^n E(f) df \quad (3.1)$$

donde m es el momento espectral, n el orden del momento y $E(f)$ la densidad de energía o varianza correspondiente a cada frecuencia (f) del espectro. Así, los parámetros espectrales utilizados en esta Tesis se definen de la siguiente manera [97, 19]:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (3.2)$$

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (3.3)$$

$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3.4)$$

$$T_p = 1/f \text{ cuando } E(f) \text{ es máxima.} \quad (3.5)$$

El cálculo de los parámetros direccionales se basa en el espectro direccional. Así, la dirección media del oleaje (D_m) se calcula mediante una doble integración en base a la dirección y la frecuencia (Ecuación 3.6.) En el caso de la dirección en el pico de la energía o dirección pico (D_p) se aplicaría el mismo cálculo, pero utilizando los datos del espectro correspondientes a la frecuencia en el pico de la energía (f_p).

$$\theta_m = \arg \left[\iint S(f, \theta) e^{i\theta} df d\theta \right] \equiv \tan^{-1} \left(\frac{\iint S f, \theta \sin \theta d(f) d\theta}{\iint S f, \theta \cos \theta d(f) d\theta} \right) \quad (3.6)$$

De la estimación de cada dirección dominante del espectro direccional, surge la dispersión angular (D_a), que indica la dispersión de la dirección en cada frecuencia del espectro [78]. Este parámetro para el caso del pico de la energía (D_{ap}) es facilitado en los datos de las boyas (VB y SB).

En base a estos parámetros espectrales también se puede calcular la potencia (y energía) por unidad de frente de ola (m) [2, 98, 3]:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_e \quad (3.7)$$

donde ρ es la densidad del agua de mar y g es la aceleración de la gravedad. La unidad básica de la potencia del oleaje son Vatios por metro de frente de ola (W/m).

El uso de los parámetros espectrales puede llevar a una representación algo distorsionada del oleaje por no tener en cuenta su forma y especialmente la existencia de más de un pico, que indican la existencia de estados de mar complejos o bimodales [97, 19, 20]. El rango de tiempo que abarca la medición del oleaje para cada espectro determina la resolución temporal de los datos. Se recomienda procesar los datos obtenidos durante períodos de 30 minutos a una hora, para evitar mezclar estados de mar muy diferentes, como momentos de calma y tormentas, aunque este tiempo también dependerá en gran medida del objetivo del análisis y del dispositivo de medición utilizado [3].

Los parámetros de oleaje suministrados por las fuentes de datos son los espectrales descritos en este apartado. En concreto las boyas facilitan H_{m0} , T_p , T_{m02} (denominado T_m), T_e , D_m , D_p y la D_{ap} . De los puntos SIMAR se han obtenido H_{m0} , T_p y D_m y del modelo WW3, H_{m0} y T_p . En el caso de los radares VILA y SILL los parámetros utilizados son H_{m0} , D_m y el periodo centroe (T_c), que no coincide con ninguno de los anteriores y es descrito en la siguiente sección.

3.2.1. Radares HF Seasonde

Esta sección se centra en la metodología de medición y estimación de los parámetros de oleaje de los radares analizados en esta Tesis, más información referente a la operativa de estos y otros radares se puede encontrar en el ANEXO.

Los dos radares HF utilizados para este estudio son de foco ancho (emiten en todas direcciones) y largo alcance, modelo SeaSonde de CODAR, con frecuencia de trabajo de 4,86 MHz y salto o barrido de $\approx 29,41$ kHz el cual determina una resolución espacial de 5 km [99]. Cada uno dispone de dos antenas, una para emitir la onda del radar y otra para recibir la retrodispersión que se produce en la superficie oceánica. Puesto que los radares emiten y reciben en todas direcciones, en la configuración de su software hay que definir unos límites de costa (CL) atendiendo a las características de la ubicación del radar, de forma que solo se procese la señal procedente de mar abierto [45]. En el caso del radar VILA el área de análisis queda comprendida entre los rumbos 221° y 41° , y en el de SILL entre 180° y 350° .

De igual forma, en este caso, se considera que la dirección del oleaje no puede provenir de direcciones fuera de estos límites. Respecto al alcance, los radares están configurados para medir entre los 5 km y los 30 km y, puesto que la resolución espacial de estos radares es de 5 km, la señal recibida es procesada de forma independiente para cinco franjas o arcos concéntricos de 5 km de ancho en torno al radar (denominados RCs, Figura 3.1).

Para poder calcular la dirección de procedencia de las señales provenientes de todo el arco, la antena receptora está constituida a su vez por tres antenas dispuestas en ángulos de 90° unas respecto a las otras, de tal forma que las diferencias relativas en la forma que cada una recibe la señal permiten identificar su origen. Este sistema es denominado en inglés 'direction finding' [60] y utiliza el algoritmo MUSIC de CODAR [100]. En este método también está implicada la generación de los denominados patrones de antena, que pueden ser 'ideales' o 'medidos' *in situ*, y que describen como es la recepción de la señal, según su origen, para cada una de las 3 antenas. Este patrón tiene

relevancia en el margen de error del cálculo de la dirección que puede estar entre los 2°-30° [41, 101].

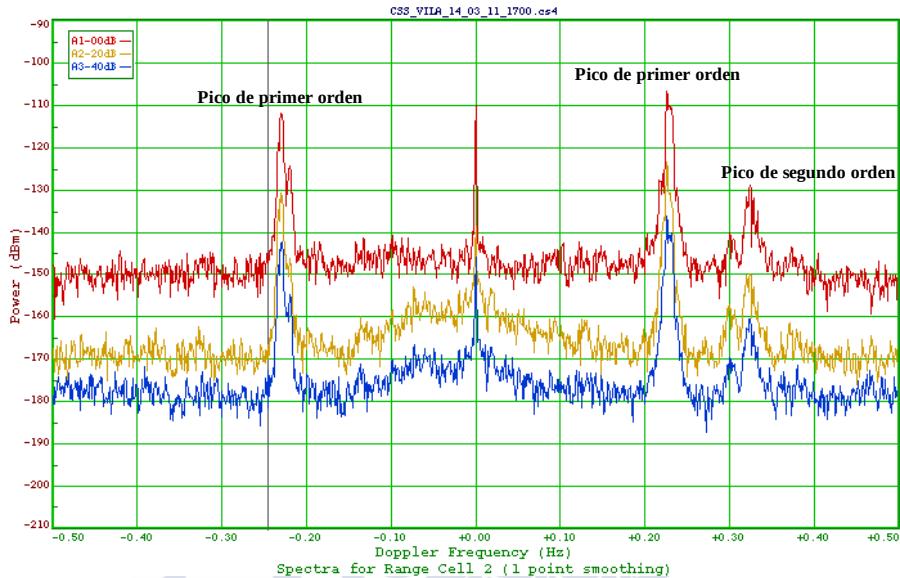


Figura 3.4: Espectro Doppler generado con el software del radar de Vilán (VILA) con la señal de las tres antenas receptoras. Los espectros están desplazados una ratio de 20-40 dB para su mejor visualización.

El sistema en el que se basan estos radares para medir tanto las corrientes como el oleaje es el siguiente. La onda emitida por el radar incide sobre la superficie del océano y esta regresa al radar solo cuando ha incidido sobre olas con longitud de onda la mitad de la longitud de la onda electromagnética del radar y con dirección a favor o en contra de la posición del radar, denominadas ‘olas Bragg’. El tiempo que tarda en regresar la señal define la distancia, y si sufre una modificación en su frecuencia, según el efecto Doppler, indicará si se ha incidido sobre una ola con dirección hacia el radar o la opuesta. El software del radar procesa todas las señales recibidas en cada una de las tres antenas receptoras, desde cada RC, durante un periodo de tiempo (30 minutos en este caso) y conforma un espectro Doppler como los de la Figura 3.4. En este surgen picos de primer orden del que se extraen la dirección

y velocidad de la radial de las corrientes y picos de segundo orden que surgen de la interacción de las olas Bragg con otras olas. Estos, mediante su normalización respecto a los de primer orden, se utilizan para extraer el espectro completo del oleaje, incluido el direccional mediante la combinación de las tres señales [52, 53, 55, 65].

En la práctica, el procesamiento que realiza el software de los radares es el siguiente. Los espectros Doppler de 30 minutos (CSS) se promedian para un tiempo definido [101], normalmente 180 minutos (6 CSS), a partir de los cuales se calcularía el espectro de frecuencia del oleaje. Aunque en teoría se podría aplicar el método de Fourier comentado anteriormente para calcular el espectro y a partir de este los parámetros espectrales del oleaje, la falta de picos de segundo orden en el espectro Doppler, especialmente en estos radares de menor frecuencia, hace que sea necesario un ajuste al modelo de Pierson-Moskowitz [65]. Para el cálculo del espectro direccional se aplica un factor o modelo cardiode al modelo de Pierson-Moskowitz [60, 65]. A partir de este se extrae la altura significativa espectral (H_{m0}), la dirección media (D_m) y el periodo centroide (T_c). Este último como su nombre indica se obtiene de la frecuencia correspondiente al centroide del espectro e incluiría todas contribuciones al espectro de los picos de segundo orden, ya sea mar de fondo o de viento [45]. Además, por limitaciones que se comentan a continuación, y recomendación de CODAR, los periodos medidos se limitan al rango 5 – 17 s [101].

La frecuencia a la que trabajan los radares HF determina una serie de límites a su capacidad de medición del oleaje, en el caso de VILA y SILL que trabajan a 4,86 MHz, las olas bragg deben tener una longitud de onda de 33 m y periodo de unos 4,6 s [45], y para que emerjan picos de segundo orden el oleaje que interactúe con estas deberá tener un periodo de 5 s o mayor según el ruido de la señal, ya que la baja frecuencia de trabajo de estos radares tiene un mayor nivel de ruido y sensibilidad a las interferencias [67, 64]. Igualmente, según el ruido de la señal la altura mínima de ola medible (1 m, Tabla A.1) aumentará lo que hace que estos radares tengan poca sensibilidad para oleaje pequeño [65]. Cuando no hay suficientes puntos Doppler para generar

el espectro de oleaje, la muestra generada es marcada por el software como dato no válido [101], y denominado en este trabajo como 'nulo' para diferenciarlo de una muestra marcada por un cribado posterior. Por otro lado, cuando el oleaje es muy elevado los picos de segundo orden pueden llegar a saturar el espectro al emerger sobre los de primer orden, pero en este caso la baja frecuencia permite a estos radares medir olas hasta aproximadamente 22 m [65, 73]. Del mismo modo, estos radares no se ven tan afectados por la presencia de elevadas velocidades de corrientes, como los que trabajan a mayores frecuencias [65].

Aunque en teoría los parámetros de oleaje se podrían calcular para zonas con batimetría irregular y para diferentes condiciones del oleaje [60], el software actual de CODAR trabaja con las siguientes asunciones: el área de media se localiza en aguas profundas, por lo que si se incluyen aguas someras en los arcos podría darse la sobreestimación de la altura del oleaje [102]; el estado del mar debe ser homogéneo en todo el arco medido y en caso de no cumplirse esta condición los parámetros de oleaje estimados resultarán una media de los estados de mar del arco [65, 45]; finalmente se considera que el espectro de oleaje es unimodal y en caso de darse estados bimodales la tendencia según algunos trabajos sería la sobreestimación de H_{m0} [76, 75]. No obstante, se espera que nuevas actualizaciones del software de CODAR vayan solventando algunas de esas limitaciones, en concreto una próxima actualización que diferenciará los parámetros de oleaje de mar de fondo de los de mar de viento [75].

3.3. Disponibilidad y tratamiento de datos

El periodo de datos disponible de los radares al final del desarrollo de esta Tesis comprende entre el 1 de enero de 2014 y el 7 de octubre de 2020. Del mismo periodo de tiempo se recopilaron datos del resto de fuentes de datos. La selección de estas fuentes de datos se hizo en base a los distintos objetivos de la Tesis. Así, las boyas VB y SB son las únicas disponibles en las proximidades de la zona de cobertura de los radares, y son la fuente de datos de referencia para la validación de los datos de oleaje generados por los radares. Además, para la descripción del oleaje en la zona de estudio se recopilaron datos de los puntos SIMAR 3002024 (S24), 3004020 (S20) y 3014002 (S02), cuyas ubicaciones completan los espacios en torno a los dos radares y las boyas. También, para profundizar en el análisis de las características de la zona, se utilizaron los datos de viento suministrados por las boyas y por la estación meteorológica de Camariñas (CW), por su cercana ubicación al radar VILA. En el caso de la evaluación del recurso de la energía undimotriz, junto con las boyas se usaron los datos de los puntos SIMAR 3004028 (S28) y 1044068 (S68), situados dentro del arco entre 10 y 15 km (RC 10 km) de los dos radares, para la validación de los resultados ofrecidos por estos. También se recurrió al modelo WW3 para comparar la variabilidad espacial de la energía undimotriz descrita por este y los radares (Figura 3.1). Más información sobre estas fuentes de datos se encuentra en el ANEXO.

La disponibilidad de datos dependió especialmente de los radares y boyas, puesto que las series de datos de SIMAR y WW3 se consideran prácticamente completas. En el caso de los radares la falta de datos se debe a problemas en el funcionamiento o ajustes de su instalación, y en el de las boyas, principalmente, a momentos en los que no han estado fondeadas. Aunque hay abundantes huecos durante pequeños periodos de tiempo (en torno a horas o días), también hay otros que abarcan años, como el caso de VILA, que estuvo sin funcionar desde mayo de 2015 hasta enero de 2018, y el hueco en los datos de SILL entre agosto de 2019 y agosto de 2020 debido en parte a no estar operativo el radar y en parte a las interferencias producidas durante unas obras en el faro de

Silleiro (Figura 3.5).

Salvo las de los radares, el resto de las series de datos se recopilaban habiendo sido ya sometidas a un control de calidad por parte de los proveedores de los datos. Aun así, se aplicó de nuevo el filtro del CMEMS (Copernicus Marine Service) [103]) confirmando el marcado de prácticamente los mismos datos ya marcados de origen.

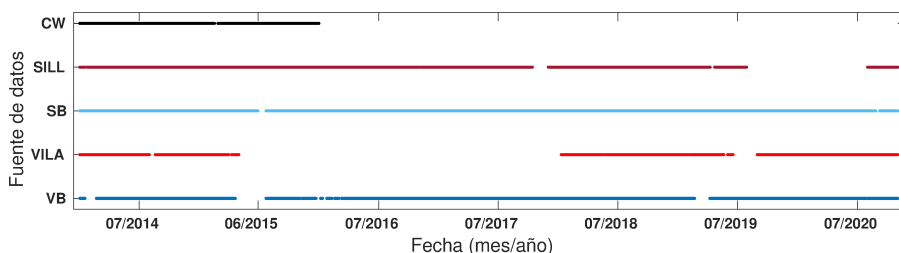


Figura 3.5: Datos brutos disponibles de la estación de Camariñas (CW), el radar de Silleiro (SILL), boya Silleiro (SB), radar de Vilán (VILA) y la boya Vilano-Sisargas (VB). Huecos más relevantes: **SILL**: 13 octubre–11 noviembre, 2017; 8–28 abril, 2019; 28 julio, 2019–1 agosto, 2020. **SB**: 28 junio–23 julio, 2015; 26 agosto–6 septiembre, 2020. **VILA**: 1–19 agosto, 2014; 31 marzo–9 abril, 2015; mayo, 2015–enero, 2018; 18–24 mayo, 2018; 20 mayo–1 junio, 2019; 17 junio–30 agosto, 2019. **VB**: 17 enero–20 febrero, 2014; 21 abril–22 julio, 2015; 23 diciembre, 2015–09 marzo, 2016; 20 febrero–7 abril, 2019.

Cribado de los datos de los radares HF

En el caso de los datos de los radares, se aplicó un control de calidad mediante una modificación del procedimiento de CMEMS (Tabla 3.1) en el que se tuvo en cuenta el elevado porcentaje de datos nulos de los radares (ver Sección 3.2.1. y Tabla 4.1) que evitaba que se detectaran datos aislados o espurios intercalados con estos.

Capítulo 3. MÉTODOS

Tabla 3.1: Resumen del procedimiento de cribado de datos con el método del CMEMS [103] y las modificaciones aplicadas.

Filtro	CMEMS	Modificación
Nulos	–	Marca propia
Rangos válidos oleaje en el Atlántico Norte	$0 \leq H_{m0} \leq 25m$ $2 \leq T_p \leq 30s$ $0 \leq D \leq 360^\circ$	=
Estancados	12 horas de estancamiento de un mismo valor en una serie de más de 50% de datos válidos	+ Se aplica un segundo filtro para marcar datos estancados aislados en un segmento de datos nulos de más de 12 h que no llega al 50% de datos válidos
Valores extremos y saltos entre un dato y el siguiente.	Detección de saltos: para H_{m0} , 2 m cada media hora, 3 m cada hora. Para T_p , 15 s.	+ Se comprueba para saltos entre datos consecutivos (30 minutos) y cada dos datos (1 hora)
Datos aislados	-	+ Se marcan los datos que no han podido ser evaluados por ningún filtro al no tener datos próximos válidos.

Datos de viento de la estación de Camariñas (CW)

Las series de velocidad y dirección de viento recopilados de esta estación (ver ANEXO) tiene una frecuencia de 10 minutos. Para obtener datos que representaran el mismo periodo de datos que VILA (30 minutos), se promediaron cada media hora.

3.4. Matrices de energía y producción de un WEC

Para el cálculo de la potencia del oleaje se ha aplicado la ecuación para aguas profundas (Ecuación 3.7). Salvo en el caso de las boyas, no se dispone del valor de T_e ni de espectros de oleaje para su cálculo, por lo que para el resto de las fuentes de datos se utilizó un factor de transformación de T_p similar al aplicado para oleajes ajustados al modelo de Pierson-Moskowitz [32, 104, 12]: $T_e = 0,8572T_p$.

Una de las herramientas más utilizadas para la descripción del recurso undimotriz son las matrices de energía. Las utilizadas en esta Tesis son cuadrículas que representan el porcentaje de ocurrencia (OP_{ht}) de cada combinación de T_e vs H_{m0} (celda, resolución 1 s x 1 m) respecto al número ideal de muestras horarias (I) del periodo de datos utilizado; sobre esta cuadrícula se superponen cinco líneas que representan la potencia (kW/m) de cada celda que cruzan y además corresponden a los percentiles 25, 50, 75, 90 y 99 % de la serie de datos [22].

$$\begin{aligned} OP_{ht} &= O_{ht} \times 100 \\ O_{ht} &= M_{ht} / I \end{aligned} \quad (3.8)$$

donde M_{ht} es el número de muestras que corresponden a cada celda.

El método utilizado para el cálculo de la energía media (Em , MWh/m) se basa en multiplicar las horas anuales o estacionales correspondientes a cada celda (OH_{ht}) de una matriz de energía, de resolución 0,5 s x 0,5 m, por la potencia media (P_{ht}) de las muestras correspondientes a dicha celda (P_j) [32, 3]:

$$\begin{aligned} Em &= \sum_{ht=1}^C P_{ht} \times OH_{ht} \\ P_{ht} &= \left(\sum_{j=1}^{M_{ht}} P_j \right) / M_{ht} \\ OH_{ht} &= O_{ht} \times H_t \end{aligned} \quad (3.9)$$

donde C es el número total de celdas y H_t es el número de horas del periodo para el que se quiere calcular la energía media (8.760 horas/año y 2.190 horas/estación del año).

Para calcular la energía eléctrica que produce un dispositivo de aprovechamiento de las olas (WEC, siglas del término en inglés de Wave Energy Converter) es necesario disponer como mínimo de la matriz de potencia del dispositivo. Esta representa la potencia eléctrica que el WEC puede generar para cada combinación $T(T_p \text{ o } T_e) \text{ vs } H_{m0}$. Así, a diferencia de las matrices de energía antes descritas, cada celda tiene un valor de potencia (W). Las matrices de potencia son diseñadas por los fabricantes o ingenieros del WEC en base a pruebas de laboratorio o en mar durante cortos periodos de tiempo, por lo que no están exentas de cierta complejidad e incertidumbre [11, 3, 105]. Para esta Tesis se utilizaron matrices de potencia de los dispositivos Pelamis y Aquabuoys basadas en trabajos publicados sobre estos dispositivos [17, 106] y se generaron sus equivalentes en horas de ocurrencia, con los datos proporcionados por las boyas, puntos SIMAR y radares. Por tanto, la producción de energía eléctrica (Wh) de los dispositivos se calculó mediante el sumatorio de la multiplicación de las matrices de potencia de los WECs por dichas matrices de horas de ocurrencia [36].

Capítulo 4

VALIDACIÓN DATOS DE OLEAJE

Este capítulo incluye contenido del siguiente artículo:

Basañez, A.; Lorente, P.; Montero, P.; Álvarez-Fanjul, E.; Pérez-Muñuzuri, V. Quality Assessment and Practical Interpretation of the Wave Parameters Estimated by HF Radars in NW Spain. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 598. Ed. MDPI, ISSN: 2072-4292. Coautores: Pablo Lorente (Puertos del Estado (PdE)), Pedro Montero (INTECMAR), Enrique Álvarez-Fanjul (PdE) y Vicente Pérez Muñuzuri (Universidad de Santiago de Compostela).

En esta sección se describe el proceso de análisis y validación de los datos de oleaje de los radares de Vilán (VILA) y Silleiro (SILL). En primer lugar, se describe el resultado del procesamiento hecho a las series de datos de los radares. Después se analiza el oleaje y viento, durante el periodo de datos seleccionado, con los datos de las distintas fuentes (boyas, modelos y radares). A través de los datos de las boyas se detalla la variabilidad entre las zonas de Cabo Vilán y Cabo Silleiro, la complejidad de sus regímenes de oleaje y su relación con la calidad y disponibilidad de datos de los radares. Posteriormente se expone la validación de los parámetros de oleaje calculados por los radares, altura

significativa espectral (H_{m0}), el periodo centroide (T_c) y dirección media (D_m), frente a las otras fuentes de datos, y más detallada frente a los datos de las boyas. Después se evalúa el efecto en la calidad de los parámetros de oleaje de los radares, cuando se reduce el número de espectros Doppler utilizados para su cálculo, así como la repercusión de modificar los límites de costa (CL) y límites en la dirección del oleaje (WB).

4.1. Procesado de los datos de los radares

En el trabajo previo de validación de Lorente *et al*, 2019 [49], del arco entre 25 y 30 km (RC 25 km) de VILA con la boya Vilano-Sisargas (VB), se mostró un elevado número de datos espurios que tuvieron cierto impacto, como un poco significativo índice de correlación lineal de H_{m0} ($R \approx 0,75$). Durante esta Tesis se ha evaluado el software con el que se estaba procesando los datos en los emplazamientos de los radares VILA y SILL. En el caso de VILA, la versión del software no estaba actualizada (versión R6). Por esto se procedió a realizar el reprocesado de los espectros con la actualización más reciente (R7), confirmando que entre ambas versiones se daban diferencias considerables, especialmente en los arcos alejados como el RC 25 km. La principal diferencia se produce en el número de datos espurios, pero también, al comparar los valores de H_{m0} con los datos de VB, la concordancia de los datos reprocesados es mayor (Figura 4.1) alcanzándose para el mismo RC una R de 0,88. En el caso de SILL el software estaba actualizado y por tanto las diferencias entre los datos procesados *in situ* y los reprocesados son mínimas, al igual que la validación con la H_{m0} de la boya de Silheiro (SB) (Figura 4.2).

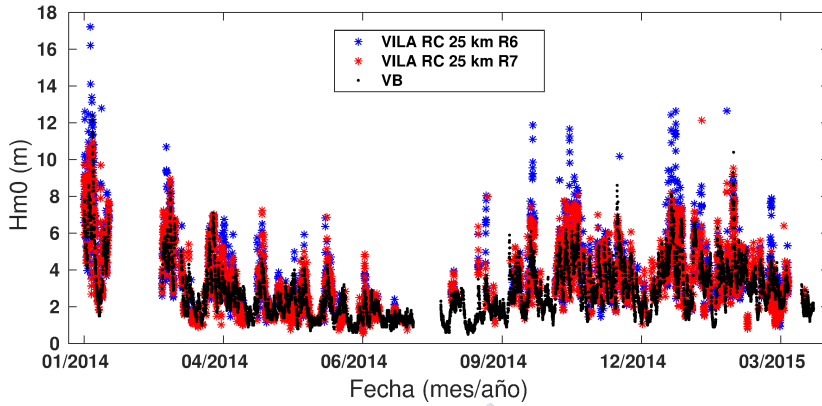


Figura 4.1: Series de H_{m0} del RC 25 km de VILA procesado en el radar (R6, azul, $R(H_{m0}) = 0,75$ [49]), VILA RC 25 km reprocesado (R7, rojo, $R(H_{m0}) = 0,88$) y de VB (negro).

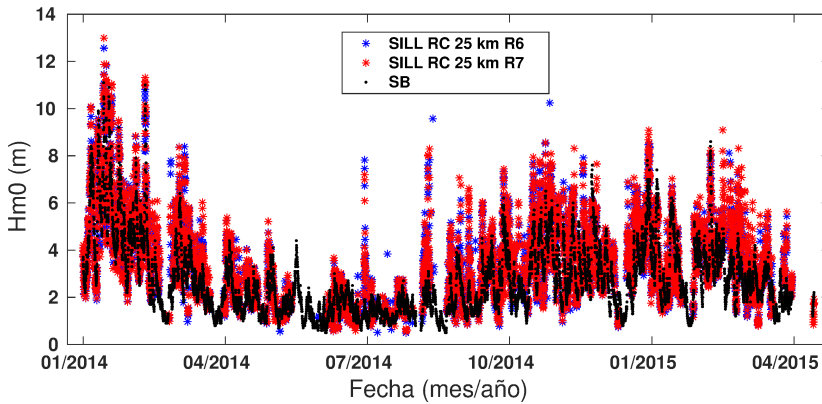


Figura 4.2: Series de H_{m0} del RC 25 km de SILL procesado en el radar (R6, azul), SILL RC 25 km reprocesado (R7, rojo) y de SB (negro).

Para llevar a cabo una validación más completa de los datos de oleaje y poder comparar los resultados que se obtuvieron para ambos radares, se reprocesaron los datos disponibles de VILA y SILL, aumentando el alcance hasta 10 RCs (55 km) frente a los 5 RCs (30 km) que se calculan *in situ*. Puesto que no hubo datos válidos de VILA desde mayo de 2015 hasta 2018, el único periodo de datos disponible y

Capítulo 4. VALIDACIÓN DATOS DE OLEAJE

coincidente de ambos radares para el reprocesado fue el comprendido entre enero de 2014 y abril de 2015.

El análisis y cribado de las series de datos resultantes, mostró que el número de muestras de los radares marcadas como nulos por el propio software es muy elevado, especialmente cuanto más alejado del radar esté el RC. En comparación con SILL, el porcentaje de datos nulos de VILA es mucho más elevado llegando a superar el 70% en el último RC (Tabla 4.1 (a)). El número de muestras de los radares marcadas tras el cribado diseñado en esta Tesis (Tabla 3.1) no resultó muy elevado, detectándose cierto incremento relativo con la distancia al radar. En los datos de las boyas, sometidos también a este cribado, el número de muestras marcadas fue similar al que ya tenían estas en origen.

Tabla 4.1: Numero de muestras del radar y boya de las zonas de Vilán (a) y Silleiro (b). **Muestras teóricas:** número ideal de muestras cada hora de las boyas (VB y SB) y cada 30 minutos de cada arco (RC) de los radares (VILA y SILL) del periodo de tiempo analizado: 01/01/2014 – 30/04/2015. **Muestras disponibles:** total de muestras disponibles de cada serie de datos. **% huecos:** porcentaje respecto al número de muestras teóricas de los huecos encontrados en las series de datos. **% nulos:** porcentaje de muestras marcadas como nulos por el software de los radares. **Fallos:** número de muestras marcadas como fallos según el cribado diseñado para este trabajo (Tabla 3.1). **Muestras limpias:** muestras válidas de cada serie de datos.

(a)	Horarias		RCs VILA (Muestras cada 30 minutos)								
	VB	5km	10km	15km	20km	25km	30km	35km	40km	45km	50km
Muestras Teóricas	11.640	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279
Muestras disponibles	10.580	21.826	21.826	21.826	21.826	21.826	21.826	21.826	21.826	21.826	21.826
% huecos	9,10%	6,44%	6,44%	6,44%	6,44%	6,44%	6,44%	6,44%	6,44%	6,44%	6,44%
% de nulos	–	61,13%	52,99%	52,25%	53,83%	55,79%	60,33%	62,87%	66,37%	68,84%	72,04%
Fallos	25	99	55	67	93	64	90	106	131	86	67
Muestras limpias	10.555	8.385	10.206	10.354	9.985	9.585	8.568	7.997	7.210	6.714	6.036

(b)	Horarias		RCs SILL (Muestras cada 30 minutos)								
	SB	5km	10km	15km	20km	25km	30km	35km	40km	45km	50km
Muestras Teóricas	11.640	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279	23.279
Muestras disponibles	11.636	22.903	22.903	22.903	22.903	22.903	22.903	22.903	22.903	22.903	22.903
% huecos	0,03%	1,62%	1,62%	1,62%	1,62%	1,62%	1,62%	1,62%	1,62%	1,62%	1,62%
% de nulos	–	45,33%	33,91%	32,08%	35,33%	37,26%	41,82%	43,02%	46,47%	48,64%	51,62%
Fallos	22	117	97	72	69	93	91	75	86	92	106
Muestras limpias	11.614	12.403	15.040	15.483	14.742	14.277	13.235	12.975	12.173	11.672	10.974

Debido a los huecos, en las series de datos de las distintas fuentes (SIMAR, boyas y radares) el número de muestras disponibles dentro del periodo de tiempo seleccionado es algo diferente. Tanto VILA como VB son los que muestran la mayor pérdida de datos, incluyendo parte del invierno de 2014 (Figura 3.5). Por esto, con el fin de disponer de los mismos datos de todas las fuentes para analizar la descripción que estas hacen del oleaje (Sección 4.2.) y el impacto de los datos nulos de los radares (Sección 4.2.1.), se emparejaron las muestras horarias disponibles. El resultado fue un tamaño muestral de 9.634, un 82,77 % de las horas teóricas. En el caso de los radares, una vez eliminados los datos nulos, el número de muestras queda muy reducido como se puede ver en la Tabla 4.2, especialmente en el caso de VILA.

Tabla 4.2: Muestras válidas de boyas y puntos SIMAR. Muestras válidas (horarias) de cada RC de VILA y SILL utilizadas para la validación estadística. Muestras correspondientes al periodo comprendido entre enero 2014 y abril de 2015.

Muestras válidas Boyas y puntos SIMAR		
9.634		
Muestras válidas radares HF		
RCs	VILA	SILL
5 km	3.449	5.093
10 km	4.276	6.222
15 km	4.345	6.421
20 km	4.173	6.107
25 km	3.976	5.899
30 km	3.510	5.459
35 km	3.245	5.313
40 km	2.916	4.992
45 km	2.685	4.742
50 km	2.399	4.460

4.2. Descripción del oleaje con las fuentes de datos

Con los datos disponibles emparejados, desde enero de 2014 a abril de 2015, se han descrito las características del viento y oleaje del área de estudio. De los radares se han utilizado los RCs 10 km, por su posición cercana al radar, lo que en teoría favorece la uniformidad del oleaje, al abarcar menos rangos de distancia a tierra y menor superficie [45]; y también por ser uno de los arcos que disponen de más datos válidos (Tabla 4.1).

En general, conforme a las rosas de oleaje presentadas en la Figura 4.3 que representan la distribución de H_{m0} respecto a D_m , en la zona de estudio se distinguen tres regímenes de oleaje (WR) principales: el de oeste-noroeste (ONO), que incluye todos los rangos de H_{m0} , y que es el dominante en la zona. El oleaje nornordeste (NNE), con olas de altura media o pequeña, y finalmente, el oleaje del sursudoeste (SSO).

El NNE solo está bien definido por VB cuya ubicación está expuesta al mar Cantábrico (y Golfo de Bizkaia) y detecta direcciones medias hasta los 62° . El resto de las fuentes de datos van reduciendo su exposición al oleaje del NE, según su ubicación sea más sur y cercana a tierra: así, VILA, limitado además por su configuración, solo muestra direcciones de ola hasta los 41° , S24 hasta los 30° , S20 hasta 16° . Y más al sur SB, aunque casi inapreciable, muestra algunas direcciones hasta los 23° . SILL tiene limitada la dirección del oleaje, por su configuración, hasta los 350° . Finalmente, S02 no pasa de los 329° .

El oleaje del ONO, el más frecuente, con la cercanía a tierra tiende a ser más oeste, según muestran S20 y S02 (debido al efecto de la batimetría, refracción). Por otro lado, según lo descrito por las boyas, el oleaje más oeste de este WR, aunque menos frecuente, presenta proporcionalmente más muestras con $H_{m0} > 7$ m. En general los puntos SIMAR describen una menor proporción de oleaje de gran altura (> 6 m) que las boyas y radares, lo que puede estar relacionado con su tendencia a infraestimar del oleaje más extremo [107].

Respecto al oleaje de SSO, mientras las boyas solo incluyen alturas de ola por debajo de 7 m, los SIMAR y radares sí muestran cierto porcentaje de oleaje de más altura.

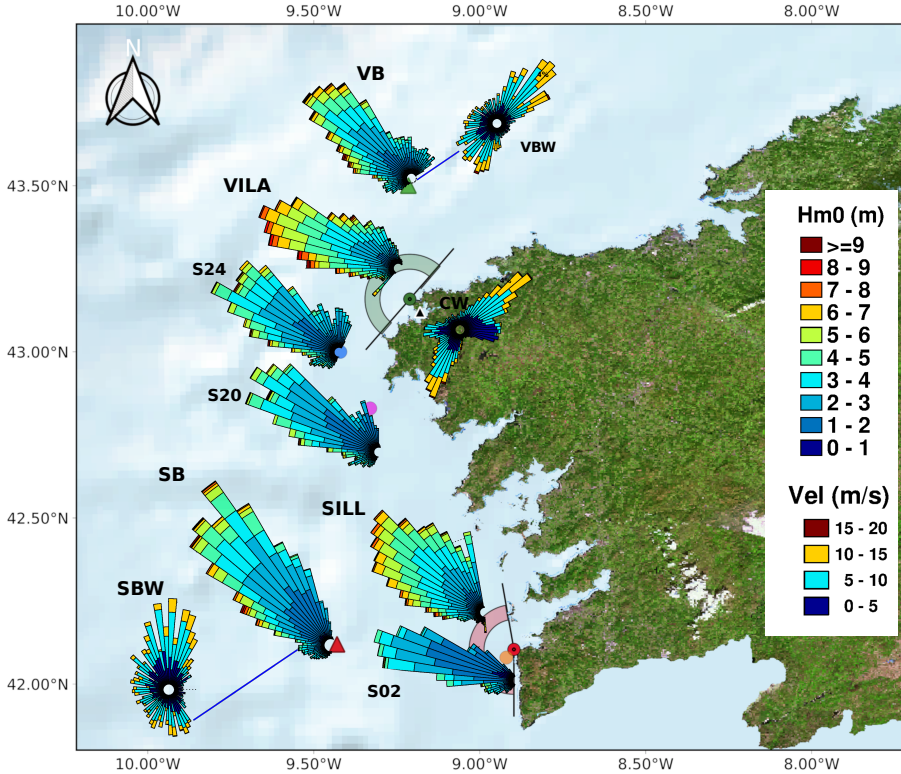


Figura 4.3: Costa noroeste de Galicia. Representación de los datos emparejados de las distintas fuentes del periodo enero 2014 - abril 2015. Arcos con color: RC 10 km de los radares. Rosas de oleaje: **VB**: boya Vilano-Sisargas; **VILA**: radar de Vilán -datos correspondientes al RC 10 km-; **S24**: punto SIMAR 3002024; **S20**: punto SIMAR 3004020; **SB**: Boya Silleiro; **SILL**: RC 10 km del radar de Silleiro; **S02**: punto SIMAR 3014002. Rosas de viento: **CW**: estación meteorológica de Camariñas; **VBW**: viento de VB; **SBW**: Viento de SB. Líneas negras junto a los radares marcan los límites de costa (CL) de los radares.

En las rosas de oleaje de los radares, se puede observar que VILA no describe de forma definida los WR NNE y SO, excepto por una saturación de datos en su límite de costa sur (CL, 221°). También

muestra una desviación general de todo el oleaje hacia el oeste-suroeste. El radar de SILL muestra una distribución aún más dispersa del oleaje, manteniendo porcentajes de ocurrencia parecidos para un amplio rango de direcciones. Aunque se detecta cierta diferenciación de las direcciones SSO por su baja abundancia, estas no parecen coincidir ni en abundancia ni en los valores de H_{m0} con lo descrito por las muestras SSO de SB. SILL muestra saturación en sus CL sur (180°) y norte (350°). En general ambos radares describen menos oleaje pequeño y en compensación mayor proporción de oleaje elevado. Esto se debe principalmente a la pérdida de datos por nulos, que según la limitación de los radares ya descritas en Métodos, es propiciada por oleajes de poca altura. Esto será desarrollado con más detalle en la Sección 4.2.1.

En la zona de Cabo Vilán, el viento que muestra más predominancia es el NE seguido del SSO. En la de Silleiro también prevalece el viento N, y el SSE solo es algo más abundante que el resto de las direcciones, especialmente a partir de 10 m/s. La estación meteorológica de Camariñas, cuyos datos son un promedio de 30 minutos, muestra con más claridad la dominancia del viento de NE y SO, además de una considerable presencia de viento de tierra. Así, al analizar la correlación del viento con los tres regímenes de oleaje descritos antes por las boyas (Figuras 4.4 (a-f)), se observa que los dos regímenes de oleaje minoritarios (NNE y SSO), parecen seguir la dirección de los vientos más fuertes de zona (a,b,e,f), mientras que el oleaje del ONO, generado principalmente por borrascas del Atlántico Norte, coincide con vientos mayoritariamente suaves (< 10 m/s), que según los datos de VB tienen una mayor tendencia SO (c) mientras que en el caso de SB hay más proporción de viento del N (d).

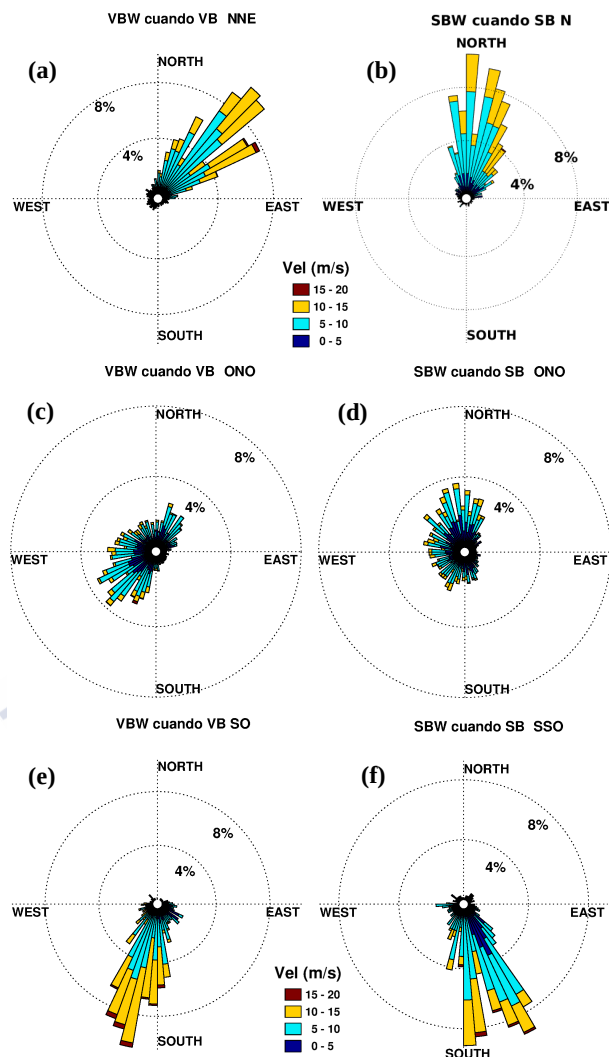


Figura 4.4: Viento descrito por VB cuando el oleaje es NNE (a), ONO (c) y SO (e) . Viento descrito por SB cuando el oleaje medio es N (b), ONO (d) y SSO (f).

Aunque la prevalencia del oleaje NO de las zonas de los cabos Vilán y Silleiro es común, ambas zonas tienen características climáticas y oceánicas diferentes por la latitud y su posición relativa a la costa que, por ejemplo, como se ha comentado antes, hace que la zona de

Capítulo 4. VALIDACIÓN DATOS DE OLEAJE

Vilán esté más expuesta a oleaje y viento de NE. Así, a continuación, se analiza y compara en detalle el oleaje descrito por ambas boyas, como base para la evaluación de los datos de los radares.

La correlación lineal entre las H_{m0} de las dos boyas es elevada (0,92), pero VB muestra mayores valores que SB, especialmente en el rango entre 2-4 m (Figura 4.5 (a)). Entre los periodos de ambas la correlación lineal es sensiblemente inferior (Figuras 4.5 (b-c)), especialmente en el caso del periodo pico cuyo diagrama de dispersión muestra poca coincidencia en los valores.

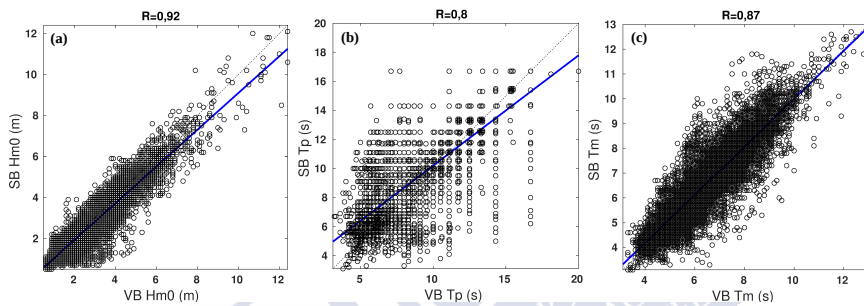


Figura 4.5: Diagramas de dispersión de H_{m0} (a), T_p (b) y T_m (c) de VB y SB. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.

En la distribución de T_p en función de la dirección pico del oleaje (D_p), se observa que el oleaje NNE detectado por VB, pero no por SB, aporta un mayor porcentaje de valores ente 6–8 s (Figura 4.6).

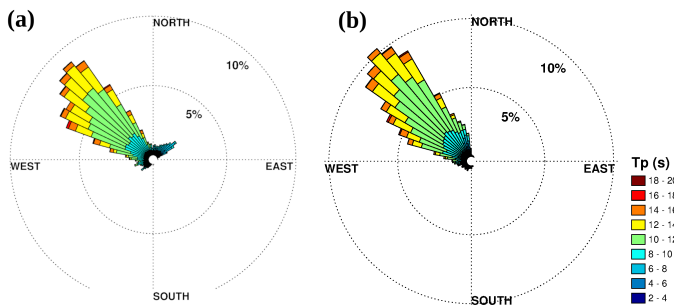


Figura 4.6: Rosas de oleaje del periodo pico (T_p) en función de la dirección pico (D_p), de VB (a) y SB (b).

Respecto a la dirección del oleaje, la distribución descrita con D_m y D_p de VB muestra diferencias significativas. Al utilizar D_p se pierde gran parte del oleaje N y SSO en favor de direcciones ONO y una mayor concentración de muestras del NE (Figuras 4.6(a), 4.7 (a,b)). SB también muestra cierta pérdida de oleaje del sur y norte, pero en menor proporción (Figura 4.7(a,b)). A la inversa de lo que sucedía con los periodos, las boyas muestran más semejanzas entre las direcciones pico que entre las direcciones medias.

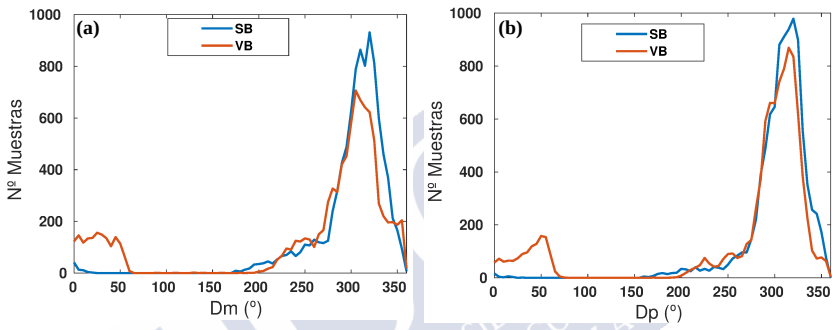


Figura 4.7: Histograma de D_m (a) y D_p (b) de VB (rojo) y SB (azul).

Además, los datos de dispersión angular (D_{ap}) de cada muestra, proporcionados por las boyas (Figura 4.8), indican una significativa dispersión de la dirección en el pico de energía, siendo algo más elevada la descrita con VB, donde la mitad de las muestras superan los 30°.

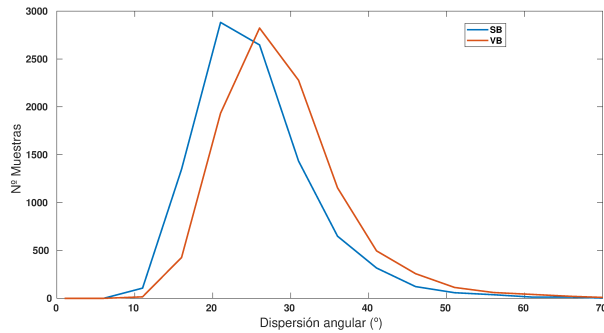


Figura 4.8: Histograma de D_{ap} de VB (rojo) y SB (azul).

Al margen de la exposición al oleaje del NE, muchas de las diferencias encontradas entre las zonas de los Cabos Vilán y Silleiro parecen deberse a una elevada complejidad de los estados de mar de la zona. Así, la presencia de un oleaje dominante del NO, que transcurre con independencia de los vientos dominantes, puede fácilmente coincidir con los oleajes NNE y SSO si coincidentes con estos vientos. Esto daría lugar, como mínimo, a espectros de oleaje muy amplios, e incluso con varios picos de energía con diferente frecuencia y dirección (espectros bi o multimodales mencionados en Métodos). Estas condiciones, explican las grandes diferencias entre D_m y D_p de VB, y los diferentes resultados en la validación de los parámetros de oleaje entre las boyas. Así, H_{m0} y T_m tienen mayor concordancia entre las boyas, pues se calculan en base a la integral del espectro de oleaje (Ecuaciones 3.2,3.4), cuyo valor en este caso puede no ser muy distinto. Sin embargo, la forma de los espectros, y por tanto la distribución de el o los picos en función de la frecuencia, sí puede ser diferente y en consecuencia también los valores que se obtienen de T_p de una u otra boya (Figura 4.5). El hecho de que las D_p de ambas boyas sean más parecidas que las D_m , se debe a que como se ha comentado, en ambas zonas la dirección NO es la más energética y predominante, por lo que para ambas la media de las direcciones en el pico de energía será más coincidente, que la media de todas las direcciones del espectro.

Esta complejidad del oleaje y su efecto en el cálculo de los parámetros espectrales tiene una incidencia aún más relevante cuando se comparan los datos de boyas y radares. En primer lugar, el cálculo de los espectros, por parte de estos radares, se basa siempre en un espectro unimodal de oleaje [76, 75] y, en segundo lugar, este espectro se basa en datos obtenidos a lo largo de todo un arco, al que se le presupone uniforme desde el punto de vista del estado de mar, la batimetría y que toda su área va a estar expuesta de igual manera al oleaje. Así, en caso de no cumplirse esta uniformidad, los parámetros resultantes son además un promedio de los distintos oleajes que se dan a lo largo del arco [45]. Asimismo, hay que considerar que parte del espectro del oleaje pueda estar fuera de los rangos del radar, ya sea por la dirección (muy perpendicular a los haces [60] o fuera de los límites seleccionados

como CL y WB), o por alturas o periodos de ola muy pequeños que no den lugar a picos de segundo orden en el espectro Doppler [65, 67, 73].

Un ejemplo de esto se da en la muestra de las 18 horas del 13/11/2014, cuyo espectro de frecuencia según VB está constituido por varios picos con similar densidad de energía ($18\text{-}12\text{ m}^2/\text{Hz}$) y frecuencias que equivalen a los periodos 11,5, 10,42, 9,39 y 8,55 s. El espectro direccional describe cómo el oleaje se concentra principalmente en dos direcciones muy distintas que corresponden a los dos picos, y una dirección intermedia que corresponde a la frecuencia intermedia entre ambos picos ($\approx 305^\circ$, 253° 202° , Figura 4.9 (a)). Respecto a VILA, tanto las direcciones como las frecuencias mostradas por el espectro parecen estar dentro de su rango de detección. Con ambos dispositivos se han estimado H_{m0} similares y D_m con unos 20° de diferencia y valores próximos a la dirección intermedia del espectro. La D_p de la boya es más próxima a la dirección del pico de mayor energía. En el caso del periodo la diferencia es de 2 s. El valor de T_c del radar es similar al del pico con la máxima energía, el T_p de la boya es más próximo al segundo pico (Tabla 4.3 (a)).

En el caso de SB, la misma muestra da lugar un espectro con una densidad de energía algo inferior, pero igualmente se dan varios picos de energía similar y distintos periodos (11,98, 9,35, 8,5 s) y direcciones (304° , 281° , 264°). Sin embargo, aunque no forma un tercer pico, el espectro se ensancha a partir del segundo pico (mayor frecuencia), con datos que representan el oleaje con direcciones más sur ($210^\circ\text{-}240^\circ$) del espectro direccional (Figura 4.9(b)). Así, aun dándose estas diferencias, los parámetros estimados por las dos boyas son similares y los radares muestran valores de T_c y H_{m0} similares. La D_m de SILL es algo más norte (281°) y próxima a la dirección de los dos picos de mayor energía (Tabla 4.3 (b)).

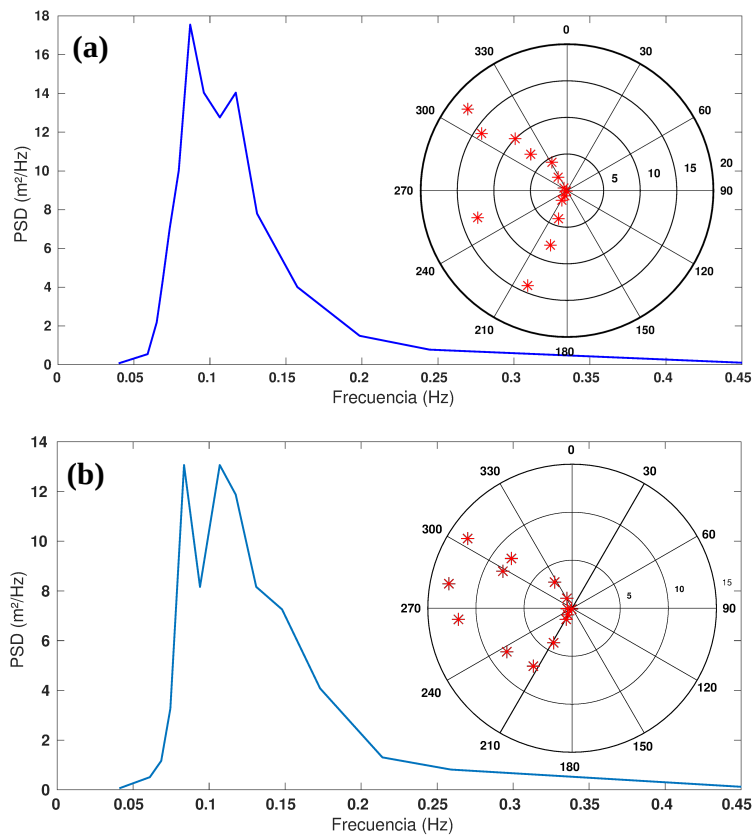


Figura 4.9: Espectro de frecuencia y direccional del oleaje de la muestra de las 18:00h del 13/11/2014 de VB (a) y SB (b).

Tabla 4.3: Parámetros espectrales de la muestra de las 18:00 h del 13/11/2014 de VB y VILA (a) y de SB y SILL (b).

(a)	VILÁN					(b)	SILLEIRO				
	H_{m0} (m)	T_m (s)	$T_{p/c}$ (s)	D_m (°)	D_p (°)		H_{m0} (m)	T_m (s)	$T_{p/c}$ (s)	D_m (°)	D_p (°)
VB	4,2	6,7	9,1	245	301	SB	4,1	6,1	8,3	250	277
VILA	4,09		11	269		SILL	3,83		11	281	

Otro ejemplo es la muestra de las 17 horas del 11/03/2014, para la que el espectro de VB muestra dos picos de muy diferente densidad de

energía (11 y $3 \text{ m}^2/\text{Hz}$), frecuencia (periodos $11,63$ y $5,45$ s) y dirección (309° y 45°) (Figura 4.10 (a)). En esta ocasión tanto la dirección como la frecuencia del pico de menor densidad de energía están en los límites de detección del radar (CL 41° y 0.2 Hz (5 s)). Así, mientras la D_m de la boya es intermedia entre los dos picos del espectro (2°), la de VILA es más próxima al pico de mayor energía (321°). También las diferencias entre las H_{m0} son mayores con una clara infraestimación por parte del radar, probablemente tanto por no detectar parte del espectro como por ser poco energético. Respecto a T_c , en esta ocasión el valor es intermedio entre T_m y T_p de la boya (Tabla 4.4 (a)). Debe recordarse que T_c es el valor del centroide del espectro del radar, el cual es considerado unimodal y entre los 17 y 5 s ($0,06$ – $0,2 \text{ Hz}$), por lo que su forma puede ser significativamente distinta a la interpretada por la boya (Figura 4.10 (a)).

Esta misma muestra analizada con los datos de SB, da lugar a un espectro con ciertas diferencias que parecen corresponder al oleaje del NE no presente en la zona de Cabo Sillero (Figura 4.10 (b)). Así, el pico de máxima energía coincide en frecuencia y dirección con el de VB, pero no se produce ningún pico para las frecuencias más elevadas, pues el resto del oleaje es poco energético, y su dirección no sobrepasa los 360° . Respecto a los parámetros, la H_{m0} de SILL es sensiblemente mayor al igual que el periodo, mostrando una clara sobreestimación que supera el periodo correspondiente al pico de máxima energía ($11,98 \text{ s}$). Y de nuevo, aunque la diferencia no es muy elevada, la D_m de SILL es más norte que la estimada con la boya, alejándose de las direcciones más energéticas ($\approx 300^\circ$) (Tabla 4.4 (b)). Estas desviaciones en las estimaciones del radar de SILL se analizan más en detalle en la Sección 4.4.

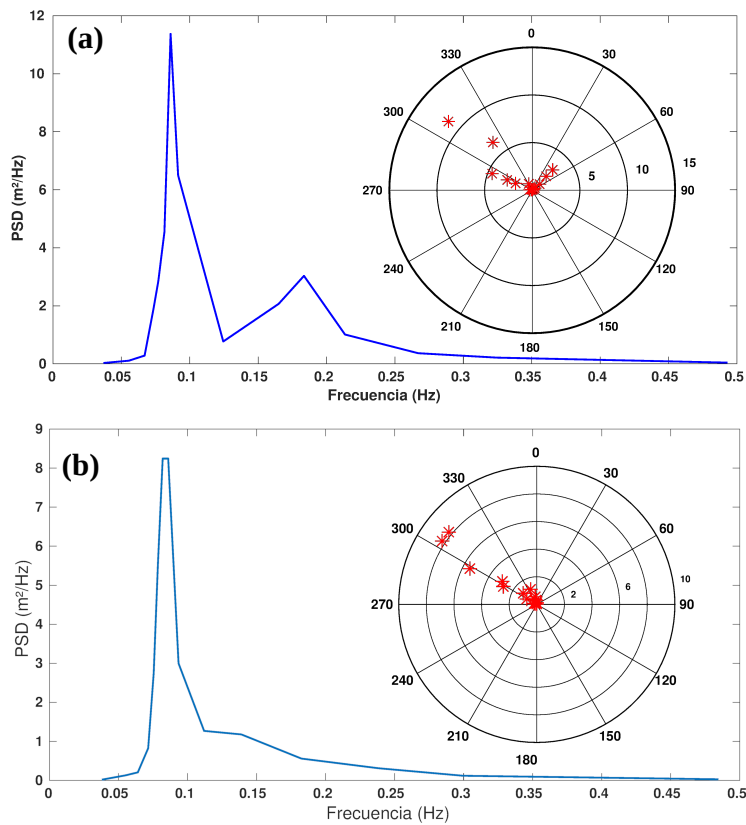


Figura 4.10: Espectro de frecuencia y direccional del oleaje de la muestra de las 17:00h del 11/03/2014 de VB (a) y SB (b).

Tabla 4.4: Parámetros espectrales de la muestra de las 17:00h del 11/03/2014 de VB y VILA (a) y de SB y SILL (b).

(a) VILÁN						(b) SILLEIRO					
	H_{m0}	T_m	$T_{p/c}$	D_m	D_p		H_{m0}	T_m	$T_{p/c}$	D_m	D_p
	(m)	(s)	(s)	(°)	(°)		(m)	(s)	(s)	(°)	(°)
VB	2,4	5,4	10	2	316	SB	2	6	11,1	327	306
VILA	1,28		6,25	321		SILL	2,83		13,49	347,5	

4.2.1. Pérdida de datos de los radares

El elevado porcentaje de datos nulos de los radares produce una gran pérdida de información. Por ello, con el fin de caracterizar y cuantificar el oleaje que no se está describiendo con los radares, se han analizado las muestras de las boyas que corresponden a estos valores nulos.

En primer lugar, en los histogramas de H_{m0} (Figura 4.11 (a)) se observa que la mayor pérdida de datos debido a nulos de VILA se da entre 0 y 4 m, por lo que la boya tiene su moda muy marcada en torno a los 2 m, mientras que la del radar está repartida entre los 2-4 m, con ligeras variaciones dependiendo del RC. Sin embargo, a partir de los 5,5 o 6,5 m, según el RC, los datos de VILA son algo más abundantes que los de la boya. Como ya se comentó anteriormente (Tabla 4.1), excepto por el RC 5 km, con la distancia al radar el porcentaje de datos nulos aumenta, siendo esto lo que determina las diferencias más significativas entre los RCs de VILA en los histogramas.

En el caso de SILL y SB, la distribución de H_{m0} (Figura 4.11 (b)), muestra que la mayor pérdida de datos se da hasta los 3 m, invirtiéndose muy rápido esta tendencia y a partir de los 4 m los datos del radar son más abundantes que los de la boya. Las modas de los RCs de SILL se sitúan entre los 2,5 y 3 m, mientras que la boya lo hace en torno a 1,5 m. En este caso, a excepción de nuevo del RC 5 km, con la distancia al radar hay mayor pérdida de datos hasta los 4 m, pero para valores superiores se da lo contrario.

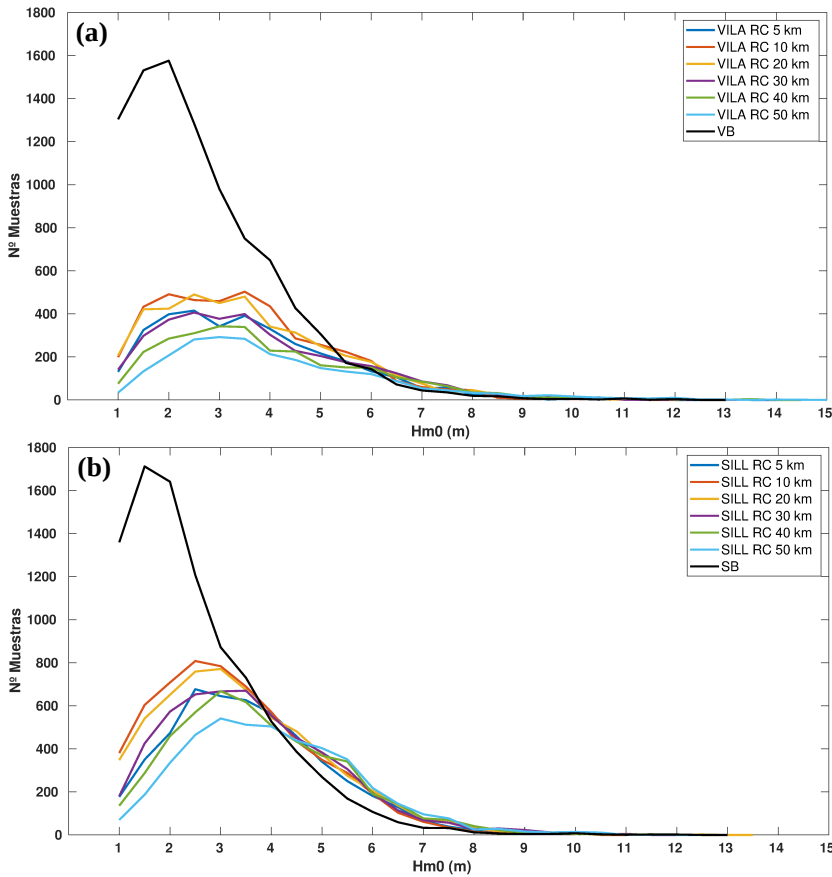


Figura 4.11: Histogramas de H_{m0} de 6 RCs de los radares (colores) y las boyas (negro). (a) VILA y VB; (b) SILL y SB.

Al realizar el análisis de esta pérdida de datos en función de la H_{m0} y D_m de las boyas, se confirma que el factor determinante sigue siendo H_{m0} , no obstante, se dan ciertas excepciones: en ambos radares el oleaje con dirección próxima a sus CL sur corresponden mayoritariamente a datos nulos; hasta los 3-4 m el menor porcentaje de nulos se da en las direcciones ONO y según va aumentando H_{m0} se da la circunstancia inversa, y el oleaje más elevado con dirección SSO o NNE no parece dar lugar a valores nulos en los radares (Figuras 4.12 (a,b)).

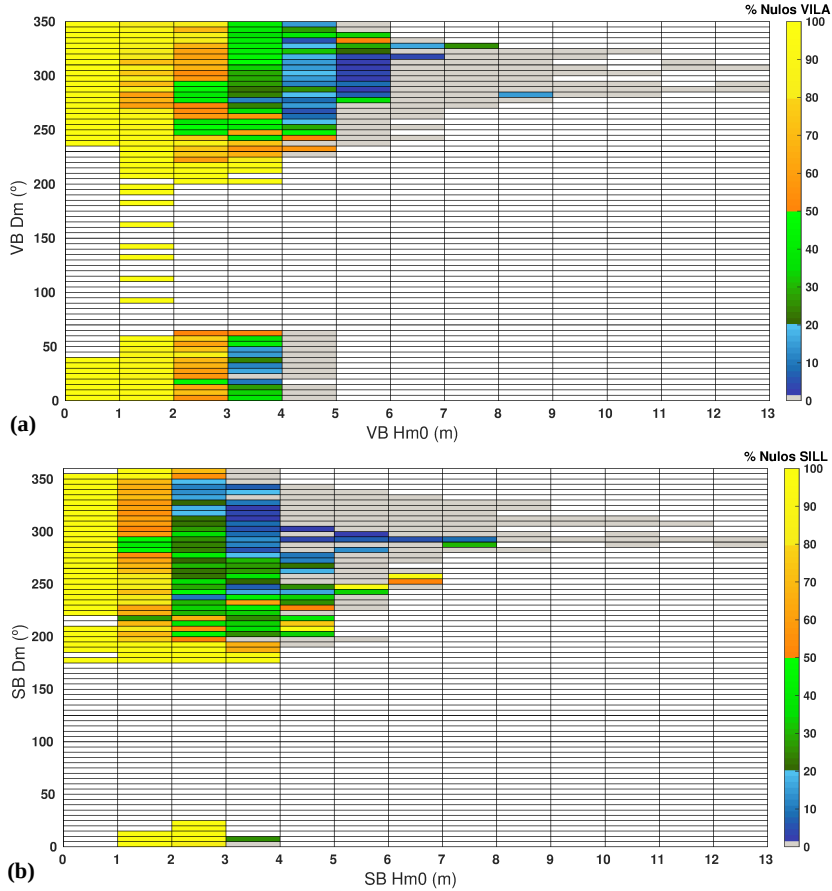


Figura 4.12: Porcentaje de datos nulos por cada celda definida por H_{m0} vs D_m de la boya, con resolución 1 m x 5°. (a) RC 10 km de VILA sobre VB; (b) RC 10 km de SILL sobre SB.

Al analizar la correlación de los nulos respecto a T_p y D_m de las boyas, en el caso de VILA (Figura 4.13 (a)) se observa cierta tendencia por la que a mayor T_p , mayor porcentaje de nulos. Así, a partir de los 6 m solo hay nulos cuando $T_p > 14$ s, lo que coincide con direcciones ONO (Figura 4.12 (a)). En el caso de SILL esta tendencia no está tan clara y aún menos para el oleaje elevado. De hecho, salvo por algunos casos de nulos con oleaje > 7 m y $T_p > 14$ s, el oleaje superior a 6 m solo da lugar a nulos para T_p entre 11 y 13 s (Figura 4.13 (b)).

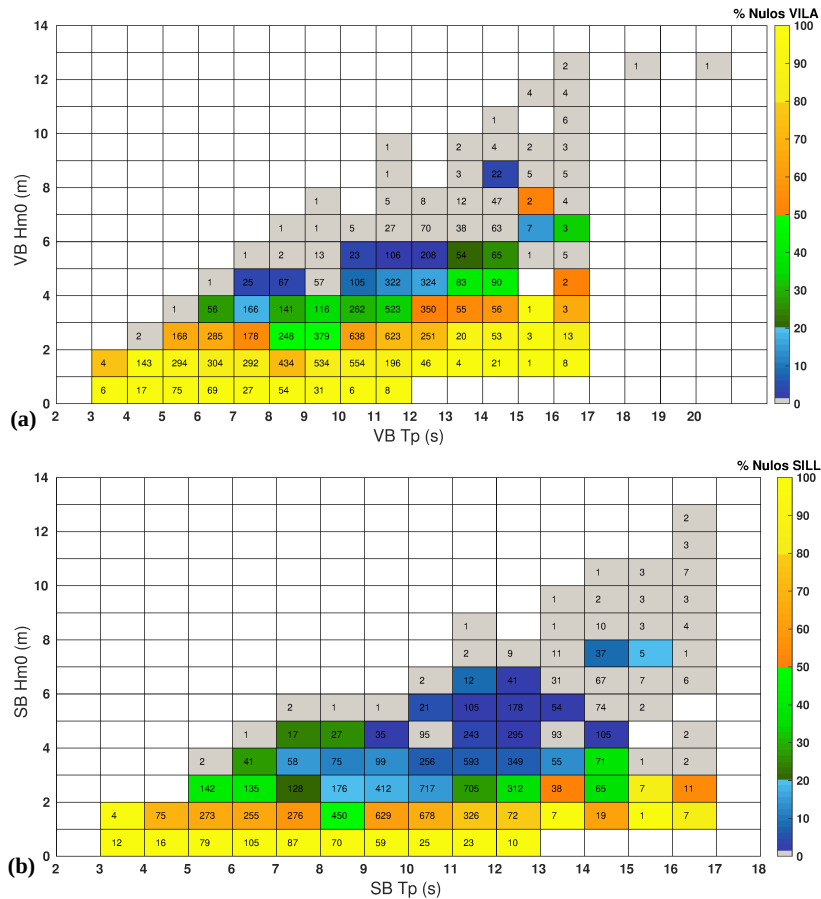


Figura 4.13: Porcentaje (color) de datos nulos del radar y número de muestras de cada celda definida por T_p vs H_{m0} de la boya (resolución 1 s x 1 m). (a) RC 10 km de VILA sobre VB; (b) RC 10 km de SILL sobre SB.

En el análisis inicial de la zona de estudio mediante rosas de oleaje (Figura 4.3), se observó que los radares mostraban mayor proporción de valores de $H_{m0} > 5$ m y se planteó que pudiera deberse a la alteración de los porcentajes por la falta de datos debida a los nulos, que como se ha comprobado coinciden mayoritariamente con el oleaje de menor altura. Así, nuevas rosas de oleaje de las boyas, generadas solo con muestras emparejadas con datos válidos de los

radares (Tabla 4.2), describen porcentajes de H_{m0} más parecidos a los de los radares (Figuras 4.14 (a-d)). Esto es más significativo en el caso de VILA (a,b), donde además los oleajes NNE y SSO de VB se reducen considerablemente en favor de direcciones ONO, pareciéndose más a la descripción que hace VILA del oleaje. En el caso de SB, los cambios al usar las mismas muestras que SILL no son tan significativos (c,d), así la distribución respecto a la dirección se mantiene prácticamente igual y solo cambia al bajar algo el porcentaje del oleaje más pequeño en favor del más elevado (> 2 m).

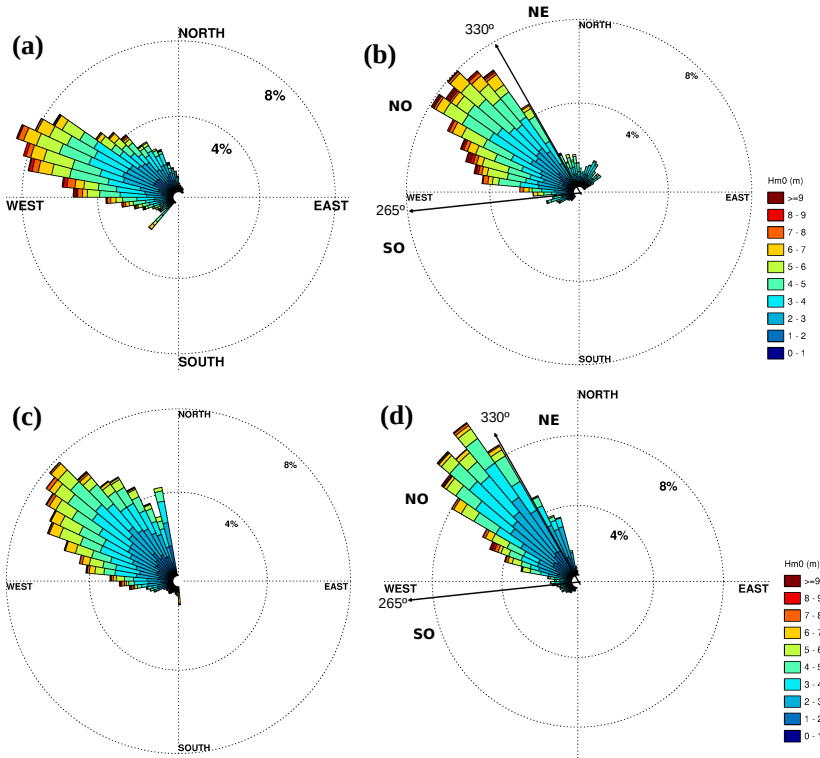


Figura 4.14: Rosas de oleaje de H_{m0} respecto a D_m . Datos emparejados limpios de VILA RC 10 km (a) y VB (b). Datos emparejados limpios de SILL RC 10 km (c) y SB (d). La flecha con dirección 330° marca el límite entre el oleaje ONO (NO) y el NNE (NE); la flecha con dirección 265° limita los oleajes SO y NO.

4.3. Validación entre las fuentes de datos

Si se comparan estadísticamente los datos válidos de los radares con las muestras correspondientes del resto de fuentes de datos (Figuras 4.15 (a-f)), se puede observar que la R de H_{m0} de VILA es significativa, siendo el valor más bajo (0,80) con SILL, y el máximo (0,88) con ambas boyas (a). Las medias de los errores absolutos porcentuales (MAPEs) más elevados se dan con los puntos SIMAR especialmente con S02, que se aleja en gran medida del resto de MAPEs (b). Respecto a la validación de los periodos (T) y D_m , de nuevo la mínima R se produce al comparar con SILL, la máxima se da con los datos de VB y se va reduciendo a medida que la fuente de datos aumenta su distancia con VILA (c,e). Respecto a los MAPES de estos dos parámetros, los resultados son más dispares y no se dan gradientes claros, así, entre VB y SILL se dan los MAPES de T más bajos (d), pero las máximas MAEs de D_m (f).

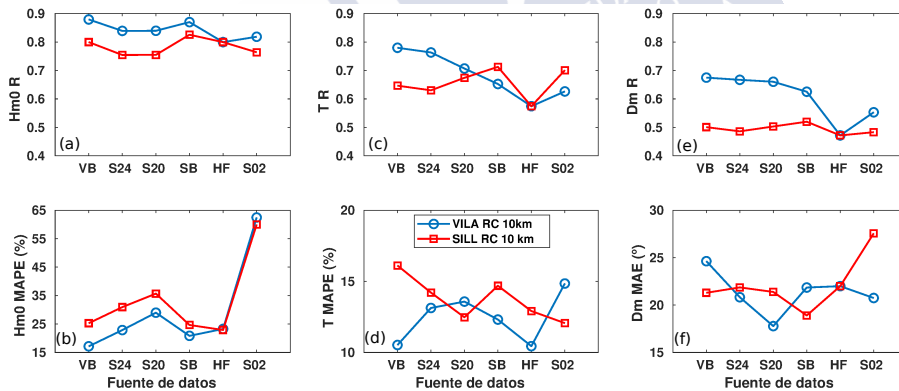


Figura 4.15: Validación de los datos de los RCs 10 km de los radares VILA (círculo-azul) y SILL (cuadrado-rojo) con VB, S24, S20, SB, VILA o SILL (HF) y S02. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m .

En el caso de SILL (Figuras 4.15 (a-f)), la validación de H_{m0} , aunque con menores R y mayores MAPEs, muestra resultados

parecidos a los de VILA en lo que se refiere a las diferencias entre la validación con unas fuentes u otras (a). Igualmente, las Rs de T y D_m toman los valores más bajos al comparar los dos radares, los máximos con SB y luego van bajando al aumentar la distancia de la fuente de datos con SILL (c,e). Sin embargo, las R de D_m son considerablemente más bajas que las de la validación de VILA (e). De nuevo, los MAPEs de T y D_m no parecen seguir ninguna tendencia y tampoco es coincidente con VILA (d,f).

4.4. Validación con las boyas

4.4.1. Validación por RCs

En primer lugar, se han validado frente a los datos de las boyas, las series de datos de los tres parámetros de oleaje (H_{m0} , T_c y D_m) de cada uno de los 10 RCs de los radares.

Aunque en valores netos, las diferencias en la validación de los 10 RCs de VILA no son elevadas, se detecta cierto punto de inflexión a partir de sexto RC (35 km) (Figura 4.16 (a-f)). Así, la R de H_{m0} para los RCs 10 a 30 km es $R \approx 0,88$, y cae hasta 0,78 para los siguientes (a). Del mismo modo los MAPEs de los primeros 6 RCs están por debajo del 19 % y para los siguientes suben hasta el 22 % (b). La R entre T_c y T_p no pasa de 0,8 (c), y sin embargo los MAPEs se mantienen en niveles bajos no superando el 12 % (d). Respecto a D_m , las Rs están por debajo del 0,7 (e) y los MAEs no pasan de los 26° (f). A diferencia del resto de estadísticos, este último, es el único que a partir del RC 35 km muestra una mejoría en el acuerdo con la boya bajando hasta los 23° para el RC 50 km.

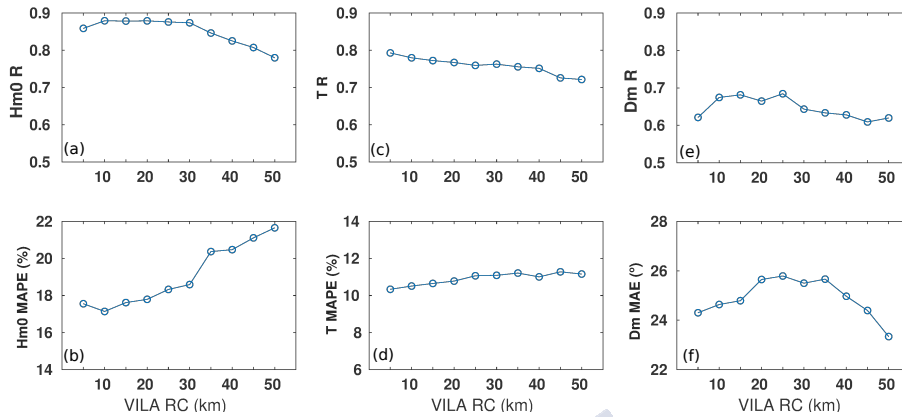


Figura 4.16: Validación de los datos de los 10 RCs de VILA con VB. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) Media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m .

En el caso de la validación de los 10 RC de SILL (Figura 4.17 (a-f)), se observa que la R de H_{m0} se mantiene prácticamente igual para todos los RC, salvo para el RC 5 km y se alcanza el máximo (0,83) en el RC 35 km (a). Los MAPEs toman valores algo más aleatorios, aunque con pocas diferencias, dándose el mínimo para el RC 10 km (24%) y el máximo para RC 50 km (27%) (b). Las R y MAPEs entre los periodos son también similares para todos los RCs ($\approx 0,7$ y 13% respectivamente) (c-d). En el caso de la dirección, a diferencia del caso de VILA, se dan significativas diferencias entre los RCs, notándose además, un incremento en el acuerdo entre boya y radar con la distancia. Así, el índice de correlación de D_m toma valores entre 0,48 y 0,72 (RC 5 km y RC 50 km). Aunque en la Figura 3.1 parece que los dos últimos RCs (45 km y 50 km) incluyen parte de tierra, esto no tiene efecto en la validación debido a que, en principio, el radar no recibe señal de esas zonas del RC (ver Sección 3.2.1).

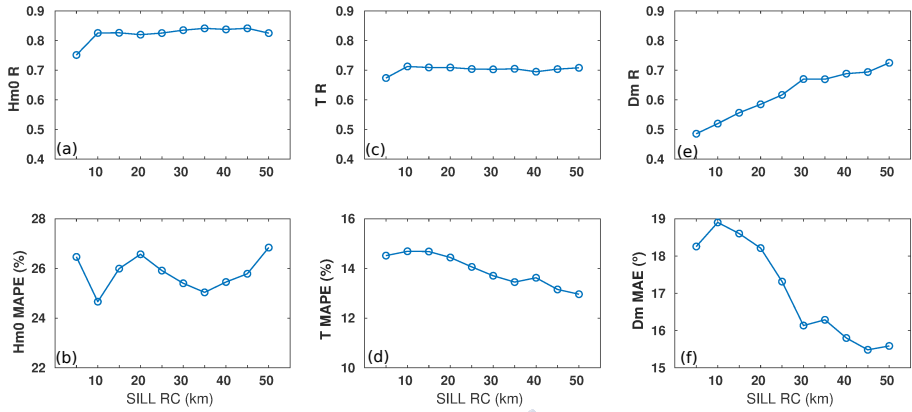


Figura 4.17: Validación de los datos de los 10 RCs de SILL con SB. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) Media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m .

4.4.2. Validación de los parámetros del oleaje

Para la comparación detallada de los parámetros de oleaje estimados por radares y boyas, se ha tomado como serie de datos de referencia el RC 10 km de los radares. Este RC, salvo por alguna excepción en el caso de SILL, muestra las mayores semejanzas con las boyas, y como se ha comentado con anterioridad dispone de los mejores porcentajes de datos válidos y su proximidad a tierra ayuda a disminuir el efecto de la irregularidad del oleaje a lo largo de su área [45].

La validación de H_{m0} entre VILA y VB mediante histogramas y diagrama de dispersión (Figuras 4.18 (a,b)), confirma el buen acuerdo. Así, las medias y desviaciones estándar son similares (a) y los valores de la pendiente y la ordenada en el origen de la línea de regresión, refuerzan la significación de R (0,88) (b). Sin embargo, en ambas gráficas se detectan algunas diferencias. En primer lugar, en el histograma (a) se puede ver cómo tras emparejar los datos válidos del radar con la boya, esta ha perdido gran parte del oleaje inferior a 2 m y todo el inferior a 1 m, y ahora el radar presenta más datos dentro de estos rangos que la boya. También se puede observar que el número

de muestras del radar es superior al de la boya para H_{m0} entre 5,5 m y 8 m. En compensación la boya muestra más datos para los rangos intermedios de H_{m0} . Parte de estas diferencias en los histogramas se pueden ver reflejadas también en el diagrama de dispersión (b), así se observa cierto esparcimiento de algunos datos, especialmente en el rango de 2 a 6 m de la boya, que denotan una sobreestimación por parte del radar, e incluso algunos que superan los 8 m parecen valores espurios no detectados por el cribado. A la inversa, otra nube de puntos dispersos muestra la infraestimación por parte de radar de una parte del rango de oleaje de 8–13 m de la boya, y también se observa la infraestimación de una parte del oleaje inferior a 3 m.

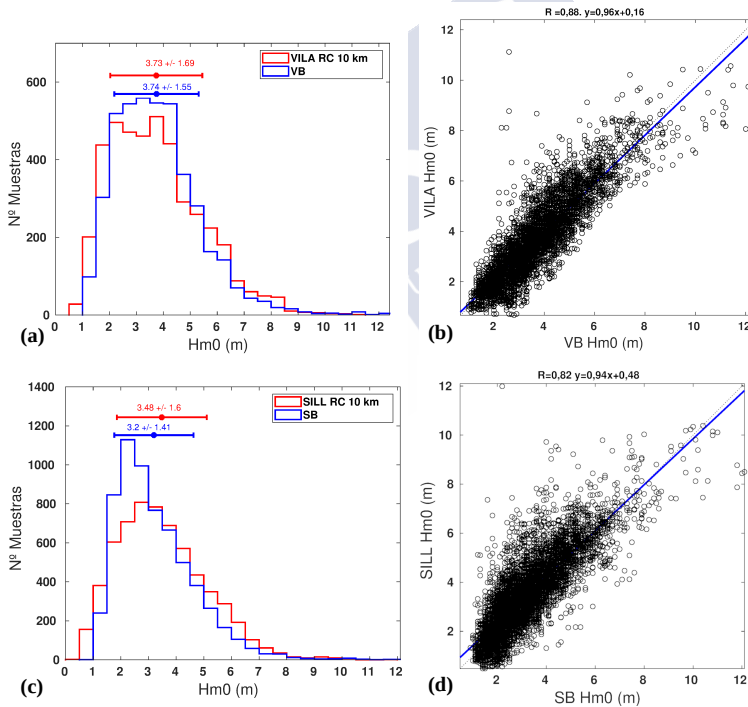


Figura 4.18: Histogramas de H_{m0} de VILA (rojo) y VB (azul) (a) y SILL (rojo) y SB (azul) (c). Diagramas de dispersión de H_{m0} de VILA y VB (b) y SILL y SB (d). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.

La comparación entre las H_{m0} estimadas por SILL y SB

(Figuras 4.18 (c,d)) revela diferencias algo más significativas. Como se observa en el diagrama de dispersión (d) la sobreestimación de los valores medios por parte del radar es muy acusada, al igual que la infraestimación del oleaje inferior a 3 m. Esto también se ve reflejado en las diferencias entre los histogramas de SILL y SB (c), donde el número de muestras de SILL a partir de 3 m es superior al de la boya, hasta aproximadamente los 8 m, compensándose con una gran diferencia en el número de muestras en el rango de 1,5–3 m. Por tanto, la media y desviación estándar de los datos de SILL son algo mayores que los de la boya.

La distribución de las direcciones estimadas con VILA y VB (Figura 4.19 (a)) describe con claridad la desviación de las D_m de VILA hacia direcciones más oeste y sur, que ya se observaron con las rosas de oleaje (Figura 4.14 (a)). Sin embargo, la distribución de los datos de VILA más al sur de 250° ya no sigue la misma forma que la de VB, manteniendo una mayor abundancia de datos que termina en un pico coincidente con la saturación de datos en su CL sur (221°). En el diagrama de dispersión (Figura 4.19 (b)) se observa que la mayor parte del oleaje NE de la boya corresponde a muestras de VILA con direcciones entre 300° – 360° . También, que el pico de datos del radar que está en torno a los 290° corresponde a un rango de direcciones de VB entre 260° – 340° y el de la saturación en 221° a direcciones de la boya entre 221° – 290° .

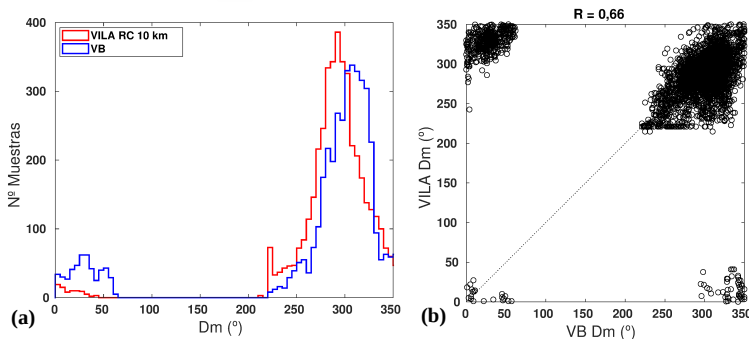


Figura 4.19: Histogramas de D_m (resolución $0,5^\circ$) de VILA (rojo) y VB (azul) (a) y diagrama de dispersión de D_m de VILA y VB (b).

En el caso de SILL, teniendo en cuenta los resultados de la validación de los 10 RCs, la validación detallada de D_m del RC 10 km se ha comparado con la validación de los RCs 30 y 50 km (Figura 4.20 (a-f)).

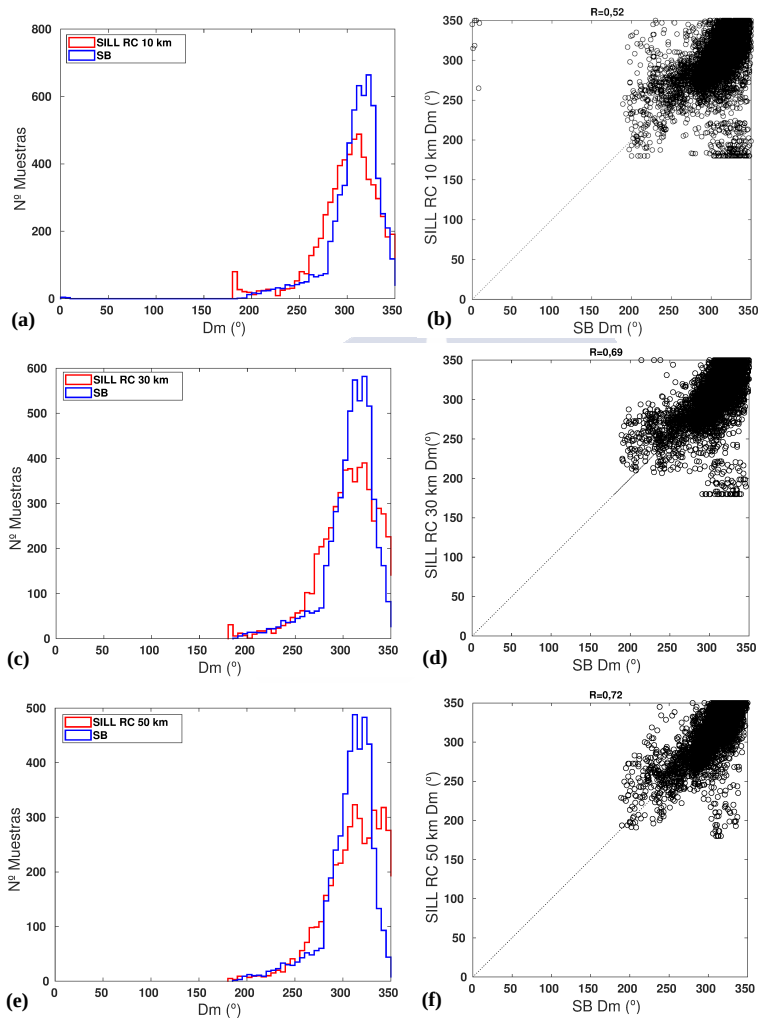


Figura 4.20: Histogramas de D_m (resolución 0,5°) de SB (azul) y los RCs 10 km (a), 30 km (c) y 50 km (e) de SILL (rojo). Diagramas de dispersión de D_m de SB y los RCs 10 km (b), 30 km (d) y 50 km (f) de SILL.

Así, los histogramas de D_m de SILL RC 10 km y SB (Figura 4.20 (a)) muestran picos coincidentes en la dirección, pero no en número, teniendo el radar menor número de muestras en favor de direcciones más oeste y sur que la boya. En el diagrama de dispersión (Figura 4.20 (b)) se observa que parte de estas direcciones sur del radar (180° - 220°) se concentran en una nube de puntos aislada que corresponde a direcciones $> 300^\circ$ de la boya. En el caso de los RC 30 y 50 km (Figura 4.20 (c-f)), esta concentración de datos parece diluirse con la distancia al igual que la saturación en el CL sur (d,f). A cambio, se produce un incremento de las direcciones norte, incluida la saturación en el CL 350° (e)).

El periodo estimado con los radares, T_c , extraído del centroide del espectro de oleaje, se considera toma valores entre el T_m y el T_p de la boya [45]. Por esto, se ha analizado su correlación con los tres periodos que facilitan los datos de las boyas: T_m , T_p y el periodo energético (T_e).

La distribución de T_c de los radares y T_p de las boyas vs sus respectivas H_{m0} (Figuras 4.21 (a), 4.22 (a)), muestra casi un total solapamiento, sin embargo, las boyas presentan valores con poca continuidad en contraste con los del radar. También se detecta que el T_p de las boyas sobrepasa los valores mínimo y máximo impuestos al cálculo del T_c de los radares (5-17 s). En los diagramas de dispersión de T_p vs T_c (Figuras 4.21 (d), 4.22 (d)) se observa la tendencia de los radares a sobrestimar T_p , especialmente SILL, para los valores entre 2-8 s de la boya. Por contra, ambos radares muestran una significativa infraestimación de parte de los T_p de las boyas entre 10 y 18 s. La R es sensiblemente mayor entre los periodos de VILA y VB (0,78), que en el caso de SILL y SB (0,71).

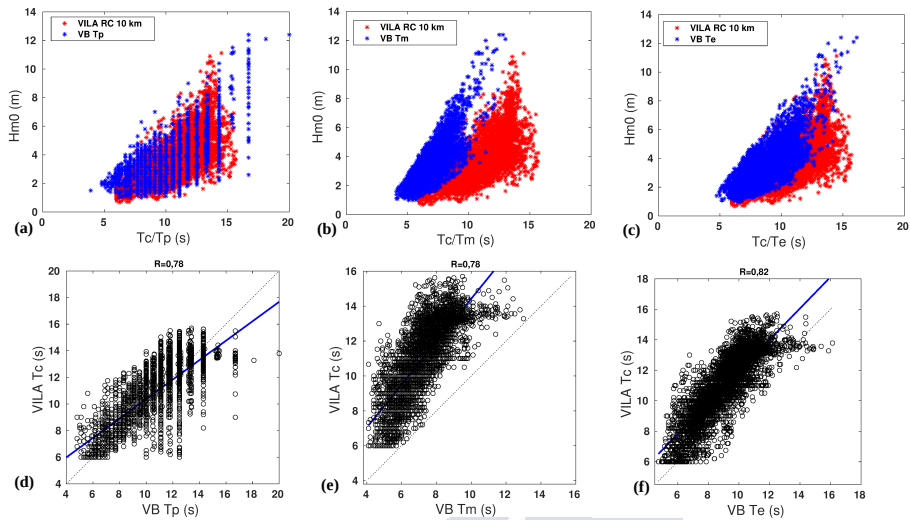


Figura 4.21: Distribución de T_p (a), T_m (b) y T_e (c) de VB (azul) y T_c de VILA (rojo) vs H_{m0} . Diagramas de dispersión de T_p (d), T_m (e) y T_e (f) de VB vs T_c de VILA. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.

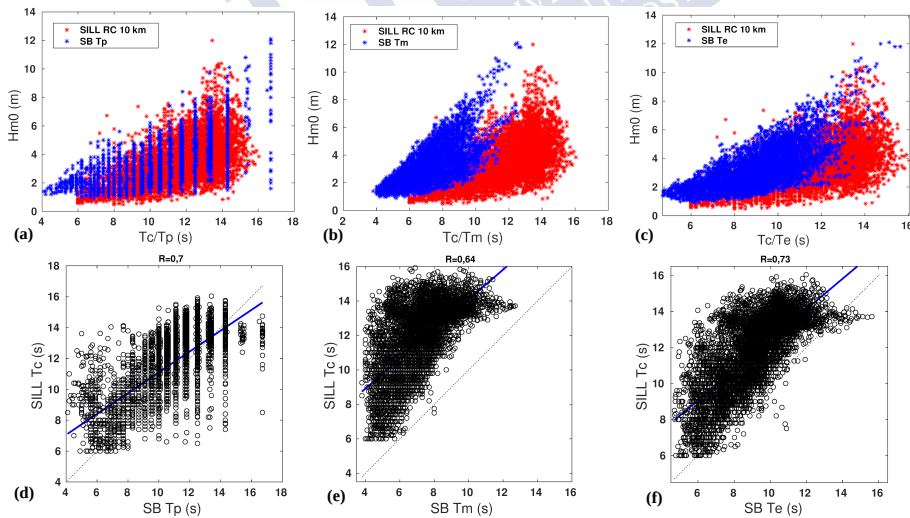


Figura 4.22: Distribución de T_p (a), T_m (b) y T_e (c) de SB (azul) y T_c de SILL (rojo) vs H_{m0} . Diagramas de dispersión de T_p (d), T_m (e) y T_e (f) de SB vs T_c de SILL. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.

Los histogramas de T_c de VILA y T_p de VB (Figura 4.23 (a)), muestran algunas diferencias como la mayor concentración de datos de VB entre 1-13 s, mientras que VILA tiene mayor abundancia de datos entre 13-14 s y 9–11 s. Sin embargo, las medias y desviaciones estándar de ambas series son similares. En el caso de SILL y SB (Figura 4.23 (b)) la diferencia entre las medias es algo mayor y la distribución de los datos está significativamente desplazada hacia valores más elevados de SILL, mostrando su mayor pico entre 13-14 s.

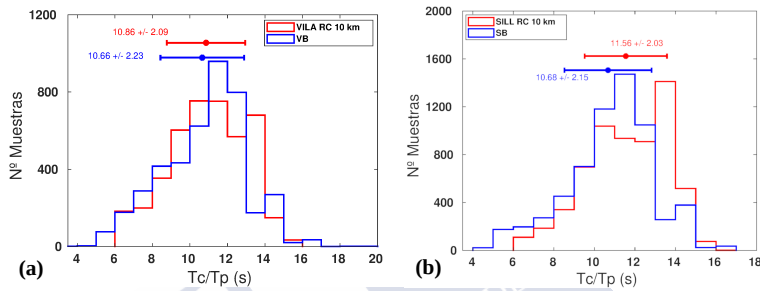


Figura 4.23: Histogramas de T_c de los radares (rojo) y T_p de las boyas (azul). (a) VILA y VB; (b) SILL y SB.

Las distribuciones de T_c de los radares y T_m de las boyas vs H_{m0} (Figuras 4.21 (b), 4.22 (b)), apenas se solapan, pero describen una forma similar. En los diagramas de dispersión (Figuras 4.21 (e), 4.22 (e)), ya no aparecen las desviaciones descritas para T_p , pero en el caso de SILL el empeoramiento de la correlación es muy significativo. Sin embargo, en el caso de VILA y VB la R es la misma que entre T_c y T_p , pero la línea de regresión está completamente desplazada e inclinada en favor de los datos del radar.

En el caso de las distribuciones de los T_c de los radares y T_e de las boyas respecto a H_{m0} (Figuras 4.21 (c), 4.22 (c)), el solapamiento es parcial, dándose de nuevo la desviación hacia valores más altos de T_c . Sin embargo, la correlación de T_c con T_e es la mayor de los tres tipos de periodo (0,82 en el caso de VILA y 0,73 en el caso de SILL) (Figura 4.21 (f), 4.22 (f)). Puesto que T_e es el periodo más utilizado en la evaluación de la energía undimotriz, una validación más detallada se muestra en la Sección 5.1.

4.4.3. Validación por WR en Vilán

Teniendo en cuenta la variedad de los regímenes de oleaje (WR) descritos en las zonas de estudio, especialmente en el entorno de Cabo Vilán, se ha realizado la validación pormenorizada de los datos de VILA en función de nueve tipos de WRs (Tabla 4.5). Estos se han definido en base a las tres direcciones del oleaje identificadas en la Sección 4.2. (Figura 4.14 (b)), y dividiendo cada una de ellas en tres subgrupos en función de H_{m0} . Los límites se fijaron por un lado en 2 m, por considerarse un punto de inflexión respecto al porcentaje de nulos en los datos del radar y 6 m por considerarse el rango $2 \text{ m} \leq H_{m0} \leq 6 \text{ m}$ como el más frecuente y por ser muy escasas las ocasiones que esta altura de ola es superada en el oleaje con dirección NNE y SSO.

Tabla 4.5: Nueve regímenes de oleaje (WR) en los que se clasifica el oleaje descrito por VB.

WR Nombre	Descripción WR $D_m (^{\circ})$ & $H_{m0}(m)$
NE2	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} < 2$
NE4	$330 \leq D_m < 90$ $2 \leq H_{m0} < 6$
NE6	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} \geq 6$
NO2	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} < 2$
NO4	$265 \leq D_m < 330$ $2 \leq H_{m0} < 6$
NO6	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} \geq 6$
SO2	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} < 2$
SO4	$180 \leq D_m < 265$ $2 \leq H_{m0} < 6$
SO6	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} \geq 6$

La validación de estos regímenes de oleaje se llevó a cabo con los datos del RC 10 km, y de dos formas diferentes:

- Mediante el emparejamiento de los datos limpios de los radares con los datos de las boyas pertenecientes a cada uno de los nueve regímenes de oleaje. Y de la forma inversa,
- mediante el emparejamiento de los datos las boyas con los datos de los radares pertenecientes a cada uno de los nueve regímenes de oleaje. El motivo de esta segunda versión del análisis es evaluar de forma directa la calidad de los datos del radar en función de dicha clasificación, ya que la desviación mostrada por los datos del radar hacia D_m más al oeste hace que dicha clasificación no coincida con la de la boya.

Los resultados del primer caso (Tabla 4.6) muestran como muchos de estos grupos se quedan prácticamente sin datos en el momento que se emparejan con los datos del radar, pues corresponden mayoritariamente a nulos (NE2 y SO2 $\approx 95\%$ de nulos). También, como se esperaba, muestras con $H_{m0} \geq 6$ m y D_m SSO o NNE son prácticamente inexistentes en los datos de la boya, por lo que los grupos SO6 y NE6 solo tienen 3 muestras. Así, si solo se tienen en cuenta los estadísticos de los grupos restantes, se observa una elevada correlación de la H_{m0} del grupo NO4 (R 0,8 y $MAPE < 20\%$). En el caso de la validación entre periodos los valores de R no son significativos pero los $MAPE$ s son bajos. Sin embargo, para el mismo rango de H_{m0} , pero dirección NNE (grupo NE4), las diferencias entre los datos del radar y la boya son considerables, especialmente en lo que respecta a D_m , pues como se ha comentado antes, parte de este oleaje queda fuera del rango de detección del radar. En el caso de los oleajes más extremos, por encima de 6 m y dirección NO (grupo NO6), el valor de R de H_{m0} y T no alcanza el 0,7 pero los $MAPE$ s son muy bajos, y la R de D_m es elevada (0,71) si se compara con el resto de grupos y con la R del total de datos que es 0,67. El oleaje más pequeño (< 2 m), solo representado por el grupo NO2, que a penas conserva el 20% de los datos de la boya, muestra una concordancia entre boya y radar muy baja para los tres parámetros de

Capítulo 4. VALIDACIÓN DATOS DE OLEAJE

oleaje. La validación de grupo SO4, al igual que la de NO4, muestra una buena correlación entre las H_{m0} y bajos errores entre los periodos. Además, la coincidencia respecto a D_m es incluso mayor. Por el valor negativo del sesgo (Bias) de H_{m0} de estos dos grupos, se puede deducir que forman parte de los datos que el radar infraestima, de acuerdo con lo observado en los histogramas y diagramas de dispersión del apartado anterior (Figura 4.18 (a,b)).

Tabla 4.6: Validación por régimen de oleaje (WR) definido por VB, de los parámetros espectrales H_{m0} , T_c vs T_p y D_m , mediante los estadísticos: índice de correlación lineal (R); Media del error absoluto porcentual (MAPE); Bias (sesgo); raíz del error cuadrático medio (RMSE); error medio absoluto (MAE). N° muestras: descripción de las muestras emparejadas disponibles antes (brutas) y después de eliminar los nulos y fallos del radar (válidas).

Agrupación por VB		N° Muestras		H_{m0}					T_c vs T_p			D_m	
Grupo WR Nombre	Descripción WR D_m (°) & H_{m0} (m)	Brutas	Válidas	VILA Nulos (%)	R	MAPE (%)	Bias (m)	RMSE (m)	R	MAPE (%)	Bias (s)	R	MAE (°)
NE2	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} < 2$	1300	72	94,46	0,24	24,42	0,09	0,54	0,74	22,18	1,46	0,11	42,91
NE4	$330 \leq D_m < 90$ $2 \leq H_{m0} < 6$	1622	807	50,25	0,76	23,02	-0,54	0,89	0,69	12,55	-0,04	0,41	47,46
NE6	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} \geq 6$	3	2	33,33	-1,00	4,06	-0,15	0,30	0,00	4,55	-0,25	-1,00	24,85
NO2	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} < 2$	1536	315	79,49	0,48	18,59	0,09	0,39	0,53	10,25	0,33	-0,05	20,59
NO4	$265 \leq D_m < 330$ $2 \leq H_{m0} < 6$	4021	2468	38,62	0,79	15,68	0,19	0,80	0,66	9,37	0,26	0,33	19,32
NO6	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} \geq 6$	359	352	1,95	0,67	10,56	-0,17	1,02	0,63	7,11	-0,62	0,71	19,37
SO2	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} < 2$	402	14	96,52	0,63	22,38	0,14	0,41	0,80	19,57	1,49	0,65	27,68
SO4	$180 \leq D_m < 265$ $2 \leq H_{m0} < 6$	581	243	58,18	0,79	17,88	-0,14	0,68	0,63	16,67	0,98	0,50	15,27
SO6	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} \geq 6$	3	3	0,00	0,86	6,18	-0,39	0,46	0,87	6,93	0,80	0,91	16,04
Todos los datos	—	9.827	4.276	56,49	0,88	17,14	0,00	0,81	0,78	10,50	0,20	0,67	24,63

Cuando la clasificación de los nueve WR se hace con los datos de VILA (Tabla 4.7), se generan grandes diferencias en el tamaño muestral respecto a los anteriores, principalmente por las diferencias en D_m antes comentadas.

Tabla 4.7: Validación por régimen de oleaje (WR) definido por VILA. N° de muestras: muestras válidas de VILA emparejadas con la boya, para cada grupo de oleaje.

Agrupación por VILA		N° Muestras		H_{m0}			T_c vs T_p			D_m	
Grupo WR Nombre	Descripción WR $D_m(^{\circ})$ & H_{m0} (m)	Válidas	R	MAPE (%)	Bias (m)	RMSE (m)	R	MAPE (%)	Bias (s)	R	MAE ($^{\circ}$)
NE2	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} < 2$	178	-0,01	38,53	-0,96	1,12	0,36	12,23	-0,40	0,04	45,52
NE4	$330 \leq D_m < 90$ $2 \leq H_{m0} < 6$	310	0,54	21,63	-0,20	0,92	0,68	12,15	0,13	-0,14	35,18
NE6	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} \geq 6$	29	-0,17	88,61	3,12	3,54	0,72	13,25	1,29	0,35	50,71
NO2	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} < 2$	429	0,40	18,40	-0,28	0,51	0,52	13,16	0,11	0,42	26,53
NO4	$265 \leq D_m < 330$ $2 \leq H_{m0} < 6$	2409	0,82	14,30	0,05	0,65	0,71	9,27	0,23	0,55	20,32
NO6	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} \geq 6$	369	0,73	15,56	0,41	1,19	0,54	7,73	-0,24	0,49	15,14
SO2	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} < 2$	60	0,44	21,56	-0,27	0,55	0,49	15,10	0,83	0,42	42,16
SO4	$180 \leq D_m < 265$ $2 \leq H_{m0} < 6$	435	0,77	16,37	-0,04	0,70	0,63	14,85	0,63	0,33	35,60
SO6	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} \geq 6$	57	0,55	11,46	0,24	0,92	0,65	7,23	-0,05	0,52	31,87
Todos los datos		4276	0,88	17,14	0,00	0,81	0,78	10,50	0,2	0,67	24,63

En los grupos NE2 y especialmente NE6 se da una exagerada baja correlación y elevados errores para los tres parámetros. En el caso de NE2 la Bias de H_{m0} es significativamente negativa (Tabla 4.7), y las direcciones estimadas son mayoritariamente NNO mientras que la boya muestra mayoritariamente direcciones NE (Figura 4.24), que en muchos casos están fuera de rango del radar (41°), especialmente si se compara con la D_p de la boya (Figura 4.24 (c)).

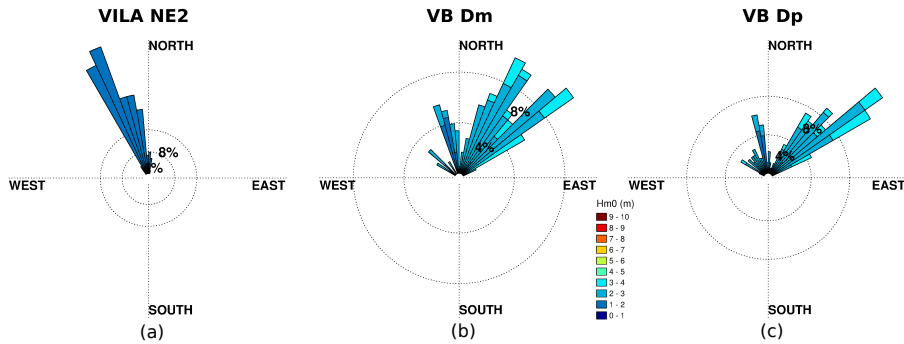


Figura 4.24: Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con el régimen de oleaje NE2 descrito por VILA (a), con la D_m (b) y D_p (c) de VB.

En contraste con las discrepancias entre radar y boya del grupo NE2, NE6 además de grandes errores a nivel estadístico (MAPE de $H_{m0} > 88 \%$, Tabla 4.7), describe diferencias respecto a la dirección aún más significativas, al corresponder mayoritariamente a oleaje de la boya con dirección NO (Figura 4.25). Esto sugiere que podría tratarse de una agregación de datos espurios, que en la validación en función de los grupos de la boya no se detectó al formar parte del grupo NO4.

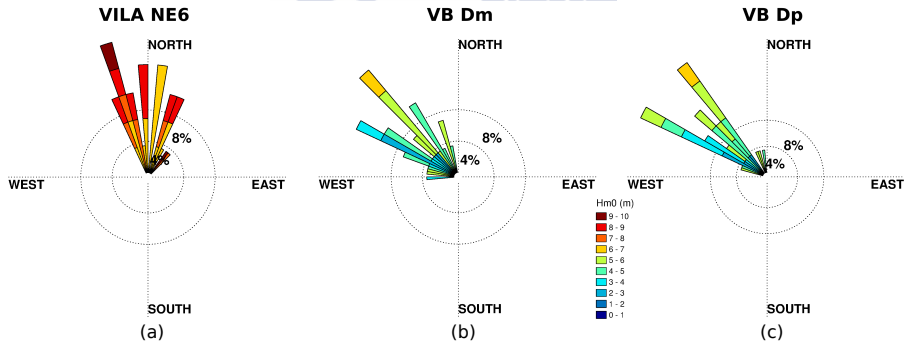


Figura 4.25: Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con el régimen de oleaje NE6 descrito por VILA (a), con la D_m (b) y D_p (c) de VB.

El grupo NE4, aunque no muestra MAPEs tan elevados de H_{m0} y T como el grupo NO2 (Tabla 4.7), sí se dan diferencias similares respecto a la dirección (Figura 4.26).

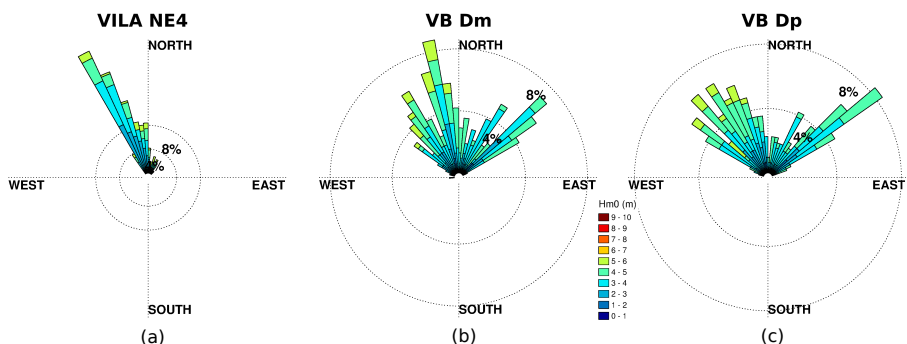


Figura 4.26: Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con el régimen de oleaje NE4 descrito por VILA (a), con la D_m (b) y D_p (c) de VB.

En los grupos NO, bajan considerablemente los MAPEs de los tres parámetros de oleaje, dándose en el NO4 la correlación de H_{m0} más elevada (0,82, Tabla 4.7), y si se calcula el valor de la R de H_{m0} para todo el grupo NO, esta asciende a 0,9. Las rosas de oleaje (Figuras 4.27 (a-i)) muestran una clara concordancia de los grupos NO4 y NO6 con el oleaje de la boya (d-i), salvo por algunas muestras que la boya representa con dirección NE y la mencionada tendencia del radar a direcciones más oeste. Sin embargo, en el caso de NO2 (a-c), cómo ocurría con el grupo NE2 (Figura 4.24) vuelve a darse una clara infraestimación de H_{m0} y la boya muestra direcciones NE fuera del rango del radar, especialmente si se tiene en cuenta D_p (c).

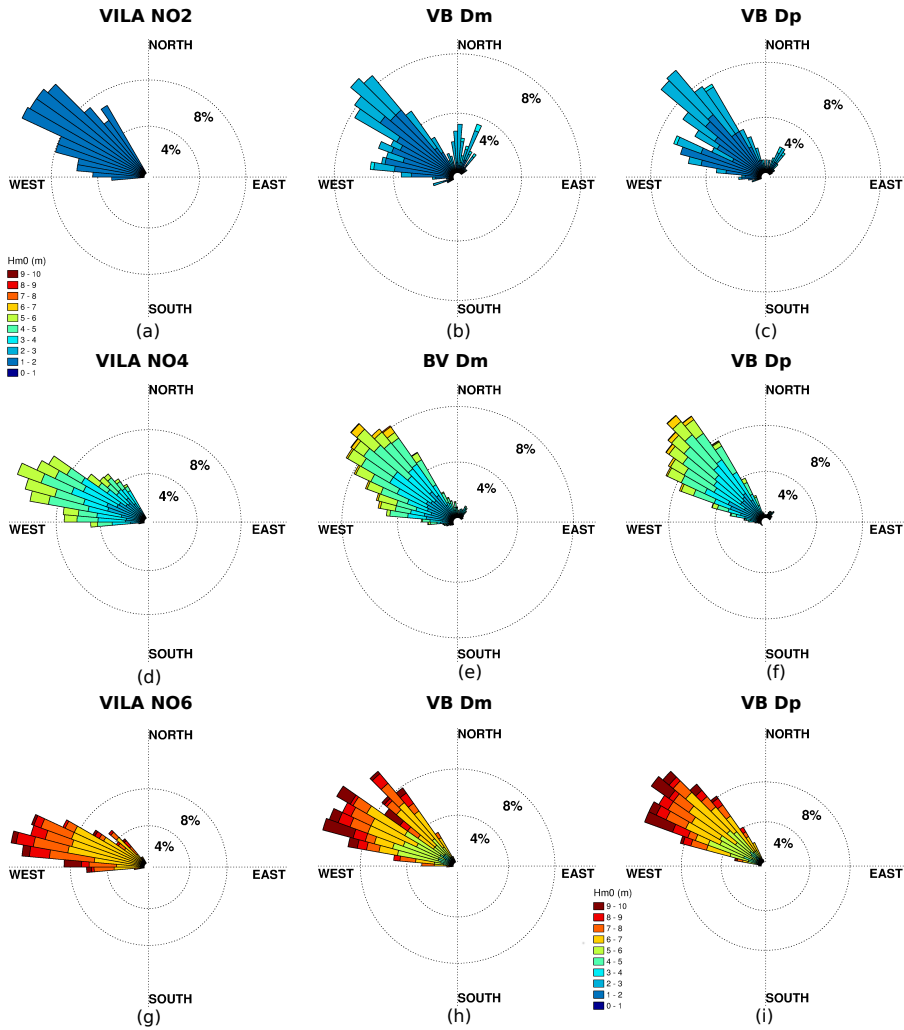


Figura 4.27: Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje NO2 (a-c), NO4 (d-f) y NO6 (g-i) descritos por VILA (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de VB.

Respecto al grupo SO, solo SO4 tiene cierta abundancia de datos como para tener en cuenta el valor de la R, de hecho, duplica el número de muestras del grupo SO4 generado en base a datos de la boya (Tabla 4.6). Así la R de H_{m0} de SO4 alcanza 0,77 y si se calcula para todo el grupo SO llega hasta 0,89. Los MAPEs de H_{m0} solo son elevados en el caso de SO2 (Tabla 4.7). Respecto a T , los MAPEs de SO2 y SO4 son algo más elevados que el resto de grupos, mientras que el de SO6 es el más bajo (7,23 %). Finalmente, es reseñable que los MAEs de D_m de este grupo, aunque no tanto como los del grupo NE, son también muy elevados (30°-42°). Tanto estos errores como la diferencia en el tamaño muestral de este grupo respecto al de la boya, respaldan las discrepancias detectadas en las direcciones sur de VILA en el análisis de D_m de la sección anterior (Figura 4.19). Así, gran parte de las muestras de la boya emparejadas con este grupo, tienen D_m y D_p del NO (Figura 4.28). A diferencia de lo que sucede con el oleaje NE, en este caso todo el oleaje parece estar dentro del rango de detección de VILA, por lo que esta discrepancia en principio no podría relacionarse con alguna limitación del radar. Por otro lado, el hecho de que la distribución de los datos de la boya en función de D_p muestre una mayor concentración de direcciones NO y menor del SO, que en función de D_m , indica posibles estados de mar de amplio espectro de direcciones e incluso bimodales. De esto se deduce que, de forma simultánea, se estaría produciendo un oleaje más energético con dirección NO y otro menos energético con dirección SO, por el que el radar estaría mostrando mayor sensibilidad. No obstante, la mayor concentración de datos de VILA de este grupo, salvo por la saturación en el CL 221°, se da en las direcciones más oeste, es decir en direcciones intermedias entre la D_m y D_p de la boya.

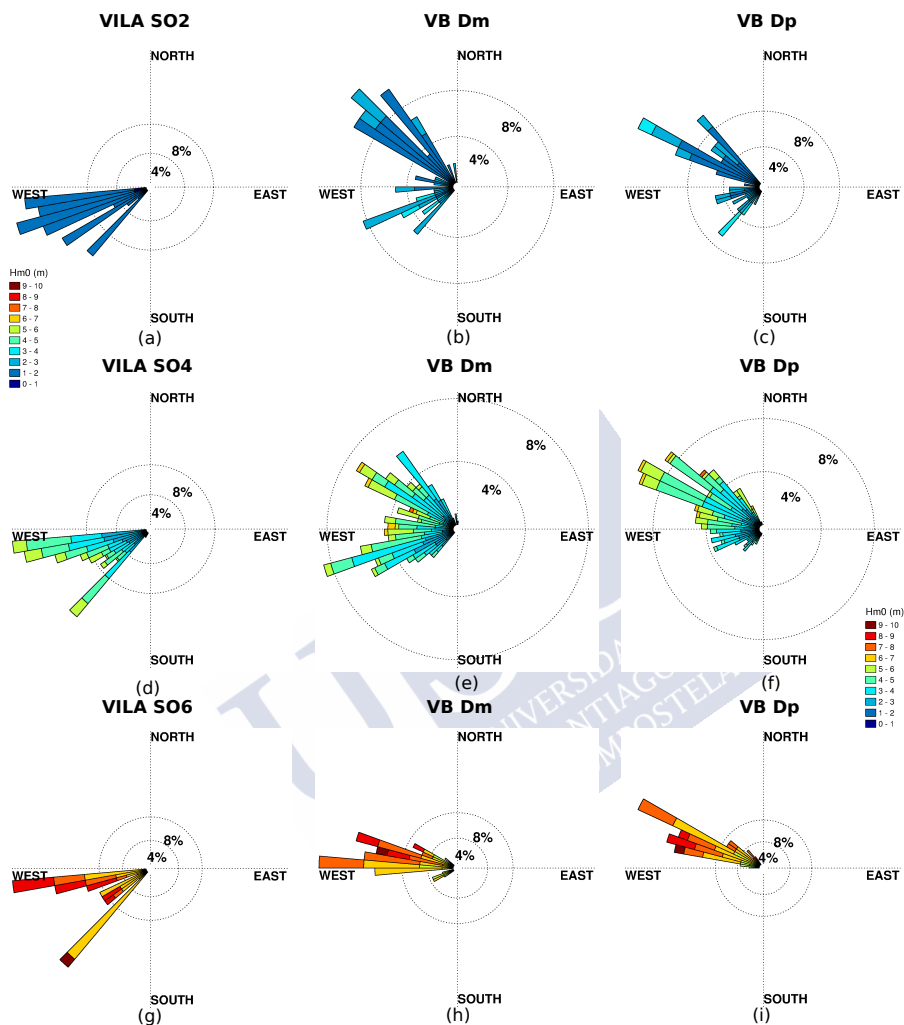


Figura 4.28: Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje SO2 (a-c), SO4 (d-f) y SO6 (g-i) descritos por VILA (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de VB.

Si se analiza la posible incidencia de vientos locales en el oleaje SO de VILA (Figura 4.29 (a,b)), con los datos de la estación meteorológica de Camariñas (CW) (a), se observa que mayoritariamente se da viento de SSO, pero también un porcentaje relevante de viento del NE y algo

del NO. En el caso del viento estimado por la propia boya el porcentaje de viento del NE es aún más elevado (b).

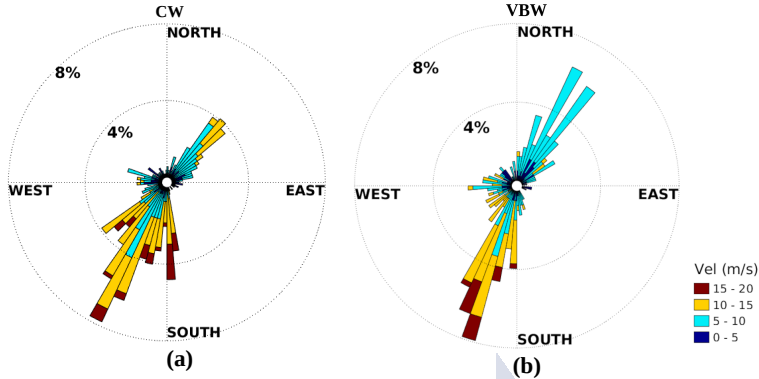


Figura 4.29: Rosas de viento con muestras coincidentes con el grupo SO de VILA de la estación de Camariñas (CW) (a) y el viento proporcionado por VB (VBW) (b).

Para relacionar este viento con los casos en los que la divergencia respecto a la dirección es mayor, se tomó como referencia las muestras de VB cuyas D_m y D_p estuvieran entre 290° - 90° (36 % de grupo SO de VILA), y se representó el viento correspondiente a estas (Figura 4.30). En primer lugar, se observa que el viento predominante tiene dirección NE, y sin embargo las D_m y D_p de la boya, salvo en algún caso aislado, no pasan de los 330° (Figura 4.28). Esto demostraría que el viento no sería el responsable de la dirección mostrada por la boya, sino que se estaría dando un oleaje de fondo con dirección NO, no afectado por el viento del NE, que además según lo estima VB no pasa de los 10 m/s (Figura 4.30 (b)). Por otro lado, también se da cierta incidencia de vientos fuertes (>10 m/s), especialmente según los datos de CW (Figura 4.30 (a)), con dirección SO, que sí podría estar influyendo en las direcciones del radar. A pesar de estas diferencias respecto a la dirección, la R entre las H_{m0} de este subconjunto de datos analizados llega a 0,86.

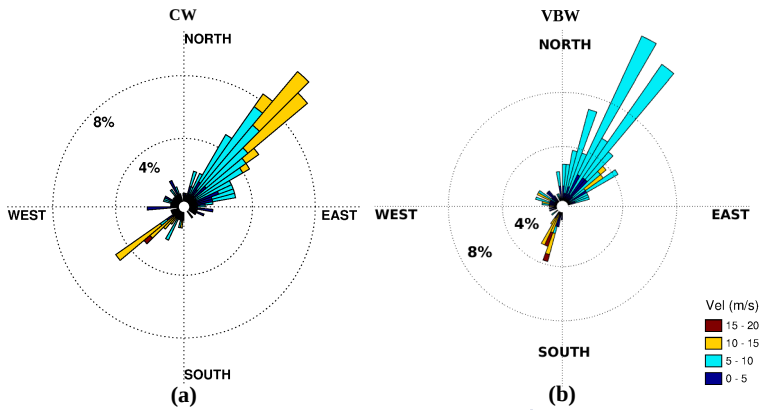


Figura 4.30: Viento coincidente con el grupo SO de VILA, cuando VB estima D_m y D_p entre 290° - 90° . (a) Estación de Camariñas (CW); (b) Viento proporcionado por VB (VBW).

Por contra, al representar el viento local correspondiente a las muestras de la saturación en el CL sur de VILA (221°), este resulta ser fuerte y con dirección S en el caso de los datos de la estación de Camariñas y entre SO y SE según los datos de la boya (Figura 4.31 (a,b)). Esto mostraría una tendencia del radar a seguir la dirección del viento, pero al tener marcado el límite de dirección de oleaje en 221° las muestras se concentran en esta dirección. Por otro lado, en este caso las D_m de la boya sí son mayoritariamente del SO (Figura 4.31 (c)), como ya se detectó en el diagrama de dispersión de D_m (Figura 4.19 (b)). Una vez más, a pesar de la saturación, la R de H_{m0} de estos datos es significativa ($\approx 0,9$).

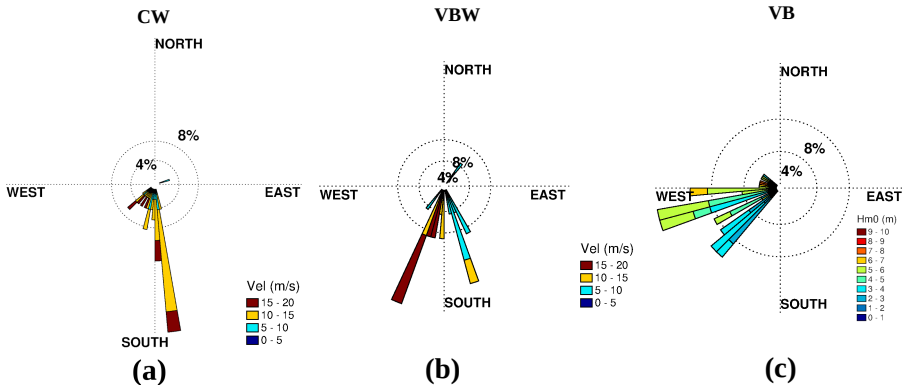


Figura 4.31: Representación de las muestras correspondientes a la saturación en 221° de VILA. Rosas de viento de la estación de Camariñas (CW) (a) y del viento proporcionado por VB (VBW) (b). Rosa de oleaje de D_m de VB (c).

4.4.4. Validación por WR en Silleiro

Aunque en el caso de SB las tres direcciones que definen los grupos de régimen de oleaje no están tan marcados, se ha llevado a cabo el mismo proceso de validación que en la sección anterior. Así, la validación de los nueve grupos en base a los datos de SB (Tabla 4.8), en general ofreció un resultado similar a la validación en base a los datos de VB. Aunque hay que tener en cuenta la menor pérdida de datos por nulos de SILL, lo que da lugar a una mayor abundancia de muestras en los grupos con $H_{m0} < 2$ m. Los estadísticos de todos los grupos de oleaje muestran una menor concordancia entre boya y radar que en el caso de VILA, excepto la validación de D_m del grupo NO que muestra una correlación significativamente mayor, alcanzando el grupo NO6 una R de 0,77. Una vez más la mejor correlación de H_{m0} se da en el grupo NO4, aunque en este caso no pasa de 0,75. También los periodos, al igual que el grupo NO6, tienen valores bajos de MAPEs. El grupo NE describe errores elevados para los tres parámetros, aunque los Rs del periodo son relativamente altas. En el caso del grupo SO se da una muy baja correlación de los tres parámetros de oleaje en comparación con los resultados del análisis con los grupos de VB.

Capítulo 4. VALIDACIÓN DATOS DE OLEAJE

Tabla 4.8: Validación por régimen de oleaje (WR) definido por SB, de los parámetros espectrales H_{m0} , T_c vs T_p y D_m , mediante los estadísticos: índice de correlación lineal (R); media del error absoluto porcentual (MAPE); Bías (sesgo); raíz del error cuadrático medio (RMSE); error medio absoluto (MAE). N° de muestras: descripción de las muestras emparejadas disponibles antes (brutas) y después de eliminar los nulos y fallos del radar (válidas).

Agrupación por SB		N° Muestras				H_{m0}				T_c vs T_p		D_m	
Grupo WR Nombre	Descripción WR D_m (°) & H_{m0} (m)	Brutas	Válidas	SILL Nulos (%)	R	MAPE (%)	Bias (m)	RMSE (m)	R	MAPE (%)	Bias (s)	R	MAE (°)
NE2	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} < 2$	1026	245	76,12	0,18	30,90	-0,24	0,61	0,60	35,95	2,22	-0,04	25,69
NE4	$330 \leq D_m < 90$ $2 \leq H_{m0} < 6$	948	755	20,36	0,65	27,61	-0,12	0,98	0,67	19,86	1,35	0,18	25,33
NE6	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} \geq 6$	3	3	0,00	-0,99	28,56	-1,89	2,07	-0,60	8,18	-1,28	0,20	26,57
NO2	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} < 2$	2124	763	64,08	0,32	35,64	0,35	0,85	0,66	17,02	1,22	0,46	20,47
NO4	$265 \leq D_m < 330$ $2 \leq H_{m0} < 6$	4268	3723	12,77	0,75	22,49	0,48	0,97	0,65	11,50	0,75	0,44	16,31
NO6	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} \geq 6$	265	260	1,89	0,63	11,83	-0,33	1,16	0,54	7,37	-0,79	0,77	12,12
SO2	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} < 2$	408	79	80,64	0,23	25,07	0,30	0,57	0,31	26,91	1,29	0,43	29,86
SO4	$180 \leq D_m < 265$ $2 \leq H_{m0} < 6$	585	389	33,50	0,50	22,93	-0,25	0,93	0,52	19,75	0,85	0,24	28,72
SO6	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} \geq 6$	7	5	28,57	-0,48	8,44	-0,48	0,58	-0,68	10,35	0,44	0,26	25,16
Todos los datos	————	9.634	6.222	35,42	0,81	24,65	0,27	0,95	0,7	14,69	0,87	0,52	18,80

En el caso del análisis de los nueve regímenes de oleaje en base a los datos de SILL (Tabla 4.9), la validación no muestra ningún valor significativo en el grupo NE salvo la elevada R del grupo NE6, que por otro lado, está basada en muy pocos datos y los MAPEs son muy elevados. En el caso de T y D_m del grupo NE, aunque no se dan Rs significativas los errores medios son relativamente bajos (máximos de 20 % y 22° respectivamente), incluso menores que los de H_{m0} (32 % en el caso de NE4).

Tabla 4.9: Validación por régimen de oleaje (WR) definido por SILL. N° de muestras: muestras válidas de SILL emparejadas con la boya, para cada grupo de oleaje.

Agrupación por SILL		N° Muestras		H_{m0}			$T_{cv}vsT_p$			D_m	
Grupo WR Nombre	Descripción WR $D_m(^{\circ})$ & H_{m0} (m)	Válidas	R	MAPE (%)	Bias (m)	RMSE (m)	R	MAPE (%)	Bias (s)	R	MAE ($^{\circ}$)
NE2	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} < 2$	263	0,30	26,24	-0,39	0,63	0,52	20,01	1,07	0,29	12,10
NE4	$330 \leq D_m < 90$ $2 \leq H_{m0} < 6$	755	0,68	32,64	0,66	0,98	0,63	17,31	1,52	0,13	19,98
NE6	$330 \leq D_m < 90$ $H_{m0} \geq 6$	12	0,97	30,64	1,21	1,67	0,54	9,83	0,55	0,14	22,63
NO2	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} < 2$	726	0,30	25,19	-0,39	0,60	0,54	22,01	1,18	0,40	22,28
NO4	$265 \leq D_m < 330$ $2 \leq H_{m0} < 6$	3424	0,80	19,19	0,27	0,75	0,62	12,04	0,71	0,56	14,56
NO6	$265 \leq D_m < 330$ $H_{m0} \geq 6$	351	0,62	18,57	0,65	1,29	0,54	6,88	-0,18	0,50	11,56
SO2	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} < 2$	154	0,11	23,56	-0,48	0,81	0,46	19,69	0,72	0,67	33,55
SO4	$180 \leq D_m < 265$ $2 \leq H_{m0} < 6$	453	0,24	43,03	0,63	1,40	0,67	18,97	1,23	-0,41	52,80
SO6	$180 \leq D_m < 265$ $H_{m0} \geq 6$	84	0,49	94,07	2,95	3,46	0,21	20,50	1,90	-0,55	110,99
Todos los datos	—	6.222	0,81	24,65	0,27	0,95	0,7	14,69	0,87	0,52	18,80

Al analizar las rosas de oleaje del grupo NE (Figura 4.32), se observa que SB muestra direcciones más NO que el límite del grupo (330°). En la representación con D_p de la boya, especialmente del grupo NE2 (Figura 4.32 (c)), puede observarse una mayor dispersión de las direcciones hacia el oeste, indicando la presencia de estados de mar de amplio espectro o incluso bimodales, como también se mostraban en el grupo NE de VILA, pero en este caso con la incidencia de oleaje del oeste.

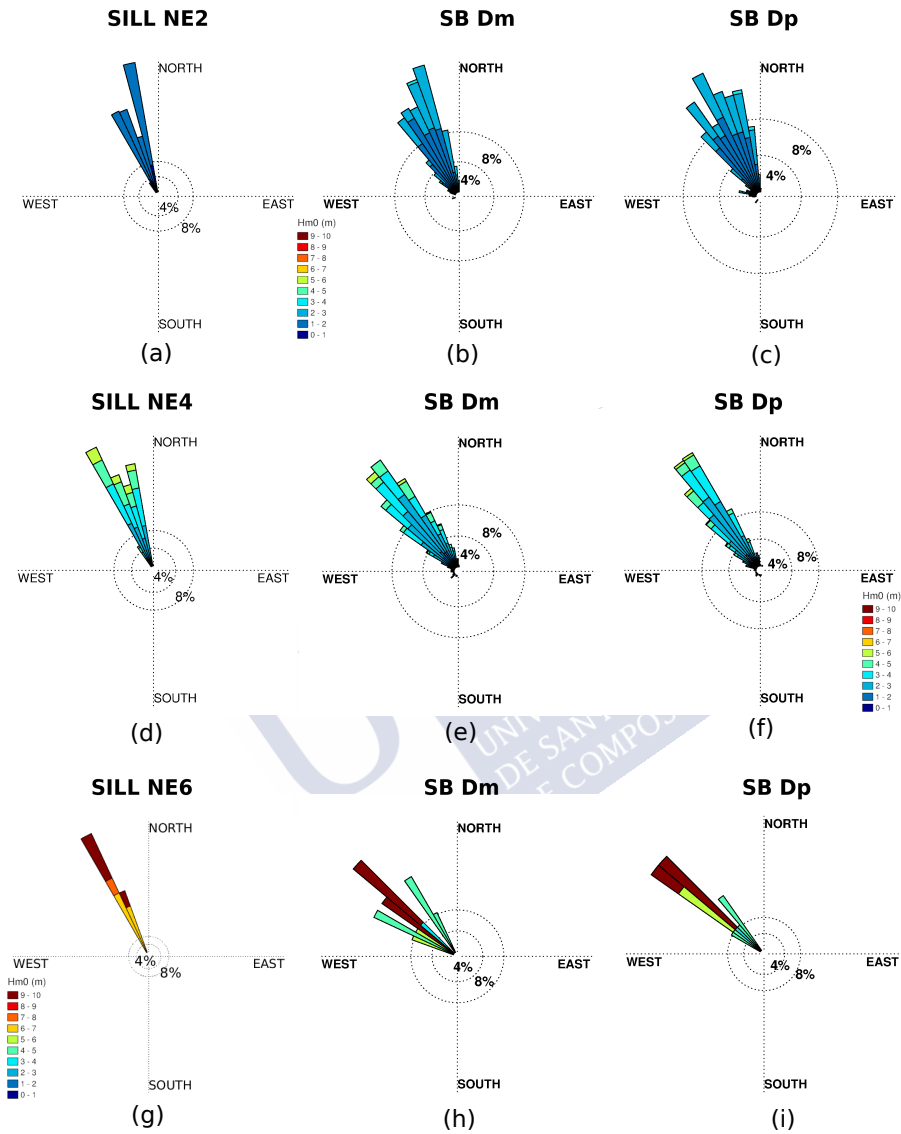


Figura 4.32: Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje NE2 (a-c), NE4 (d-f) y NE6 (g-i) descritos por SILL (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de SB.

Dentro de este oleaje norte está incluida la ya comentada saturación de datos del radar en su CL norte (350°). Esta resalta especialmente

en el grupo NE2 (Figura 4.32 (a)). Al analizar los datos de viento proporcionados por SB cuando esto sucede (Figura 4.33 (a)), se observa que este es principalmente NNE, pero también hay viento SSE. Así, de nuevo el viento parece ser una causa para esta saturación, pero no de forma tan significativa como el caso de la saturación del CL sur de VILA. Las muestras de SB que corresponden a esta saturación tienen D_m del NNO (Figura 4.33 (b)).

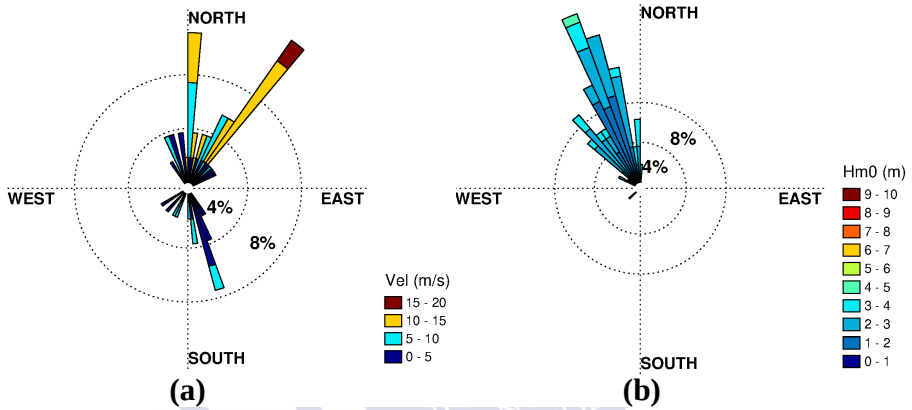


Figura 4.33: Muestras correspondientes a la saturación en 350° de SILL. Rosa de viento de SB (a) y rosa de oleaje de D_m de SB (b).

En el grupo NO se produce un buen acuerdo entre las H_{m0} de SB y SILL con una R significativa (0,8) y el MAPE inferior al 20%. De nuevo, aunque la correlación lineal de T y D_m no es significativa, los errores son bajos. Este grupo, que es el más numeroso, muestra una significativa desviación de D_m hacia el oeste, en comparación con SB (Figura 4.34), lo que respalda la desviación detectada en el histograma de D_m de SILL (Figura 4.20 (a)). Además, en el caso de NO2 (Figura 4.34 (a-c)), la boya describe una considerable proporción de muestras con direcciones algo más al N del límite de este grupo (330°) (b,c), y también, según D_p , hacia el oeste (c), indicando que este régimen de oleaje al igual que NE2, con alturas de ola pequeñas, incluye estados de mar bastante heterogéneos con amplio espectro de direcciones.

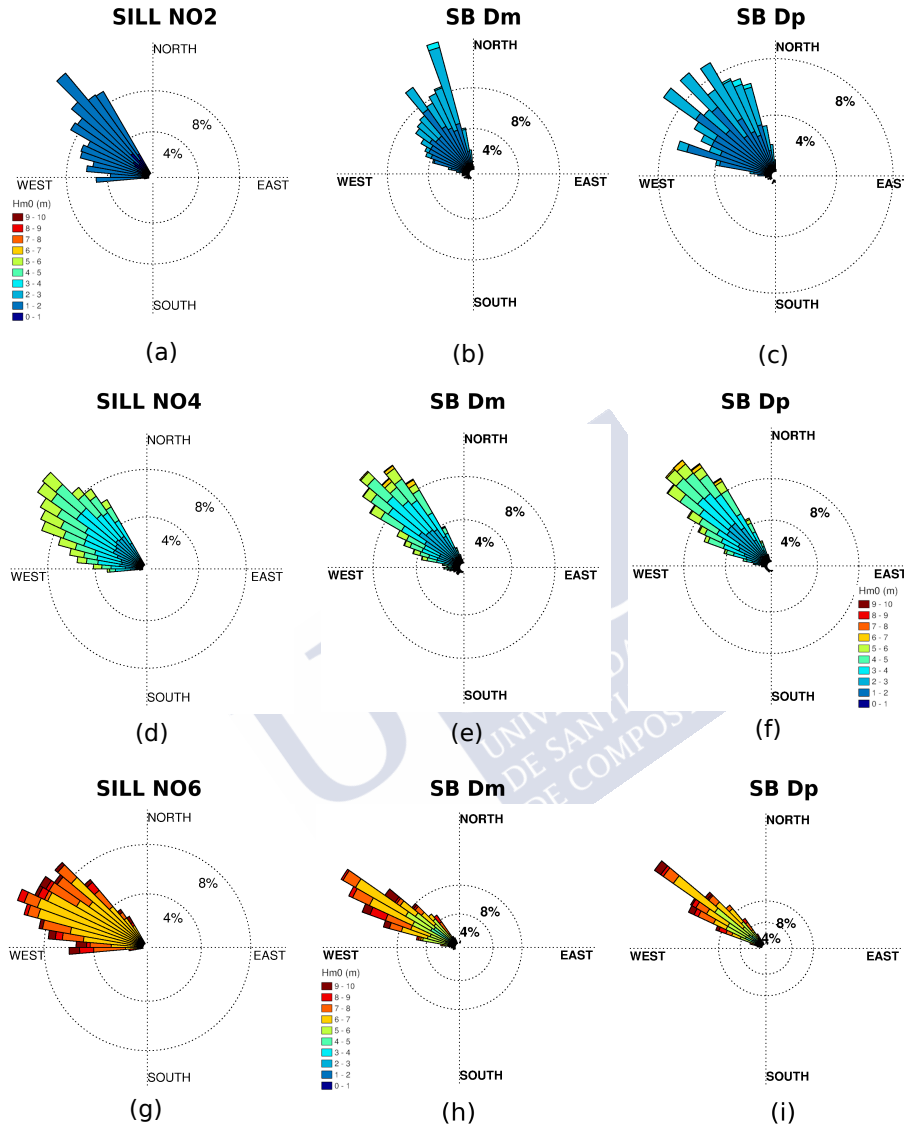


Figura 4.34: Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje NO2 (a-c), NO4 (d-f) y NO6 (g-i) descritos por SILL (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de SB.

Los estadísticos resultantes de la validación de los tres parámetros de grupo SO muestran un gran desacuerdo (Tabla 4.9). Las Rs de H_{m0} son muy bajas así con muy altos los MAPEs, especialmente para SO4 y SO6, algo que también sucede con la D_m que alcanza un MAE de casi 111° para el grupo SO6. En este grupo, al igual que el NE6 de VILA, las rosas del radar y la boya muestran distribuciones del oleaje muy distintas, tanto en valores de H_{m0} como de D_m , salvo un pequeño porcentaje de muestras de la boya con $H_{m0} > 7$ m (Figura 4.35 (g-i)). En el caso de los periodos, los errores no son tan exagerados (máximo $\approx 20\%$). En los grupos SO2 y SO4 de SILL, al igual que sucedía entre VILA y VB, SB incluye muestras con direcciones NO e incluso N, e igualmente la distribución en función de D_p de la boya muestra una mayor concentración de datos en la dirección NO que en la SO, especialmente en el caso SO4 (Figura 4.35 (f)). De nuevo, en un gran porcentaje de los casos, parece evidente una elevada heterogeneidad del estado de mar cuando el radar describe oleaje SSO, incluso para H_{m0} por encima de los 2 m. En general, aunque SILL muestra direcciones en todos los rangos del grupo (265° - 180°), al igual que sucedía con VILA, parece concentrar la mayoría de las muestras en las direcciones más oeste, a excepción de la saturación de datos en su CL sur (180°). Así, de nuevo parece que las D_m del radar son intermedias entre las definidas por la boya (Figura 4.35 (a-f)). Esto explicaría que la desviación hacia direcciones sur del histograma de SILL respecto al de SB, solo se dé hasta $\approx 260^\circ$ (Figura 4.20 (a)).

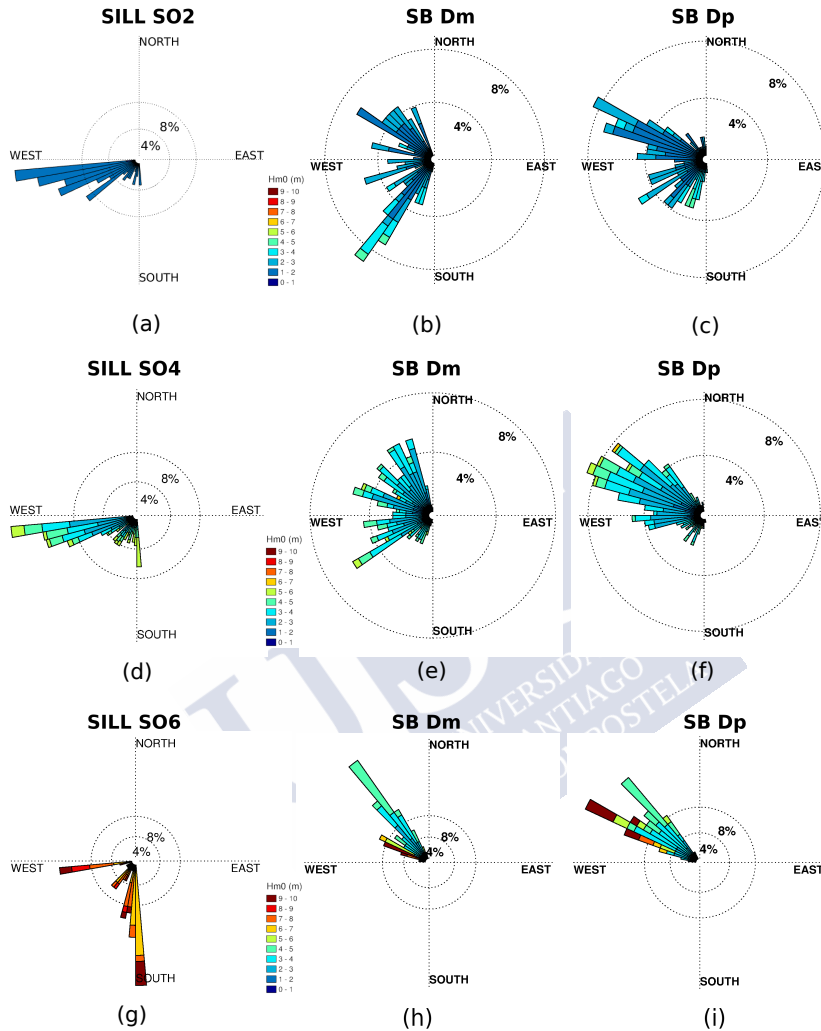


Figura 4.35: Rosas de oleaje correspondientes a datos limpios emparejados con los regímenes de oleaje SO2 (a-c), SO4 (d-f) y SO6 (g-i) descritos por SILL (a,d,g), con la D_m (b,e,h) y D_p (c,f,i) de SB.

Si se analiza la relación del grupo SO con el viento local calculado con la boya, se observa que este se da mayoritariamente con dirección NE y SE y con elevada proporción de velocidades > 10 m/s (Figura 4.36 (a)). En el caso de las muestras con mayores diferencias

de D_m entre el radar y la boya, por ejemplo, cuando SB estima D_m y $D_p > 290^\circ$ (44 % muestras del grupo SO), el viento es, salvo algunos casos, NNE (Figura 4.36 (b)). Por lo que, al igual que pasaba con VILA, ni la boya ni el radar siguen la dirección del viento, denotando un dominante oleaje de fondo del NO.

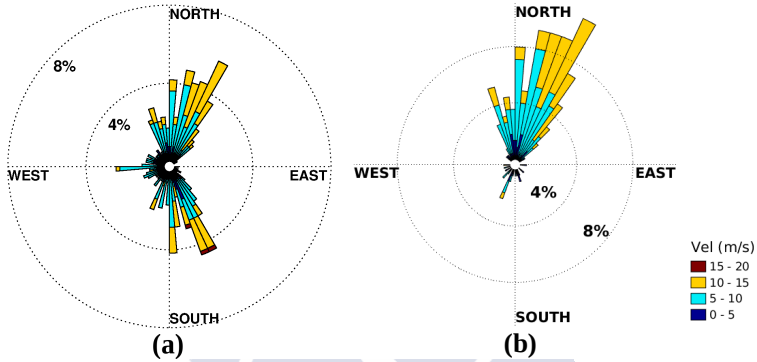


Figura 4.36: Rosa de los vientos de SB con muestras coincidentes con el grupo SO de SILL (a) y cuando, además, D_m y D_p de SB se sitúan entre 290° - 90° (b).

Respecto a la saturación en el CL sur (180°) de SILL, no existe correlación alguna con la dirección del viento ni el oleaje mostrado por la boya (Figura 4.37).

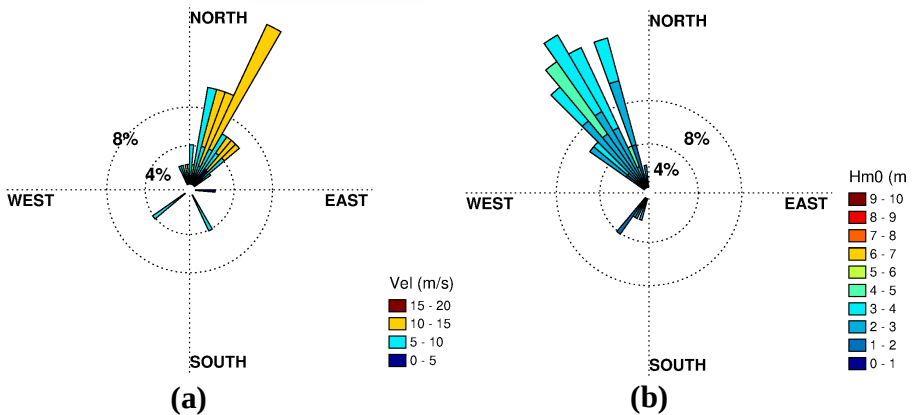


Figura 4.37: Representación de las muestras de SB correspondientes a la saturación en 180° de SILL. Rosa de viento (a) y rosa de oleaje en función de D_m (b).

4.5. Análisis de discrepancias significativas

En esta sección se detalla el análisis realizado de algunos datos que mostraron resultados especialmente anómalos en las validaciones anteriores. A continuación, se describen de forma conjunta las particularidades de las muestras de los radares cuya T_c infraestiman el valor de T_p de las boyas (Figuras 4.38 (a), 4.39 (a)).

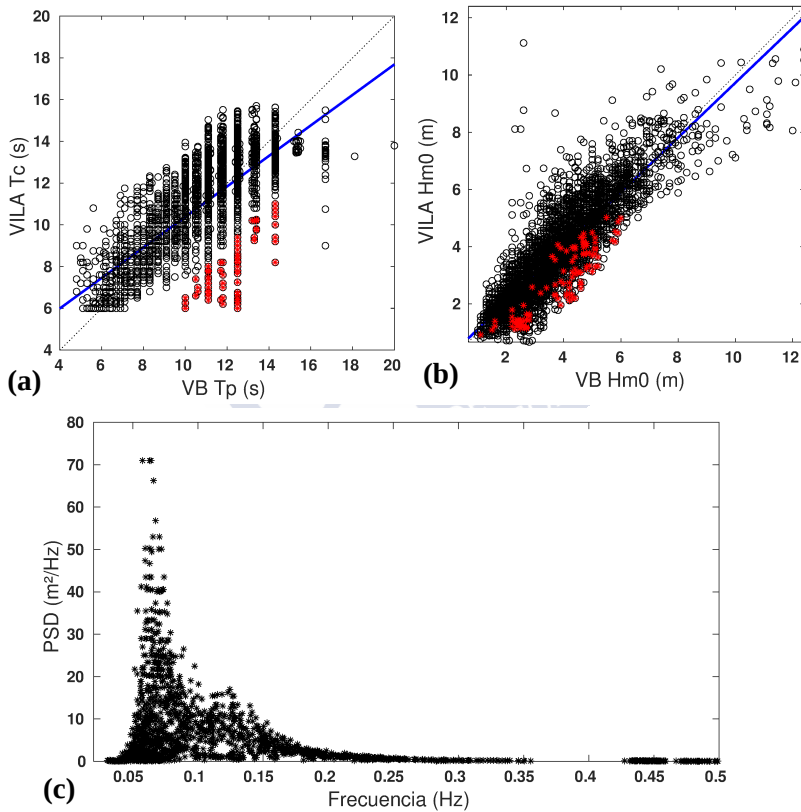


Figura 4.38: Datos en rojo, correspondientes a las 111 muestras del RC 10 km de VILA que infraestiman el valor de T_p de VB, representados sobre el diagrama de dispersión de T_p vs T_c (a) y el diagrama de dispersión de H_{m0} (b). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos. Representación de los 111 espectros de VB que corresponden a los datos marcados en rojo (c).

En primer lugar, se confirmó que las H_{m0} de la boya también son infraestimadas por estas muestras (Figuras 4.38 (b), 4.39 (b)), pero no se detectaron diferencias significativas respecto a D_m . Y en segundo lugar, que los espectros de ambas boyas (Figuras 4.38 (c), 4.39 (c)), correspondientes a estas muestras, son bimodales similares al del ejemplo de VB mostrado en la Figura 4.10 (a). En estos casos el ajuste de los datos de los radares a un modelo unimodal provoca que el centroide se ubique en un área del espectro de mayor frecuencia (menor periodo), no coincidiendo con el pico de mayor energía y menor frecuencia (mayor periodo) que define el T_p de las boyas.

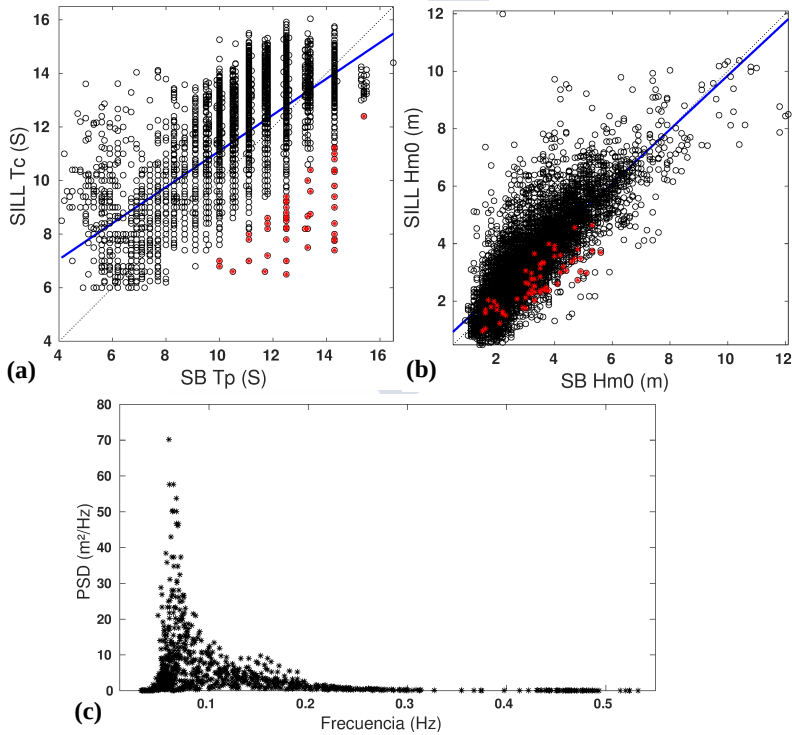


Figura 4.39: Datos en rojo, correspondientes a las 63 muestras del RC 10 km de SILL que infraestiman el valor de T_p de SB, representados sobre el diagrama de dispersión de T_p vs T_c (a) y el diagrama de dispersión de H_{m0} (b). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos. Representación de los 63 espectros de SB que corresponden a los datos marcados en rojo (c).

En el caso de SILL, también hay un conjunto de muestras cuyas T_c sobreestiman considerablemente los T_p de SB (Figura 4.40 (a)). Tras su análisis se comprobó que mayoritariamente no corresponden a errores significativos en la estimación de H_{m0} (Figura 4.40 (b) y tampoco de D_m .

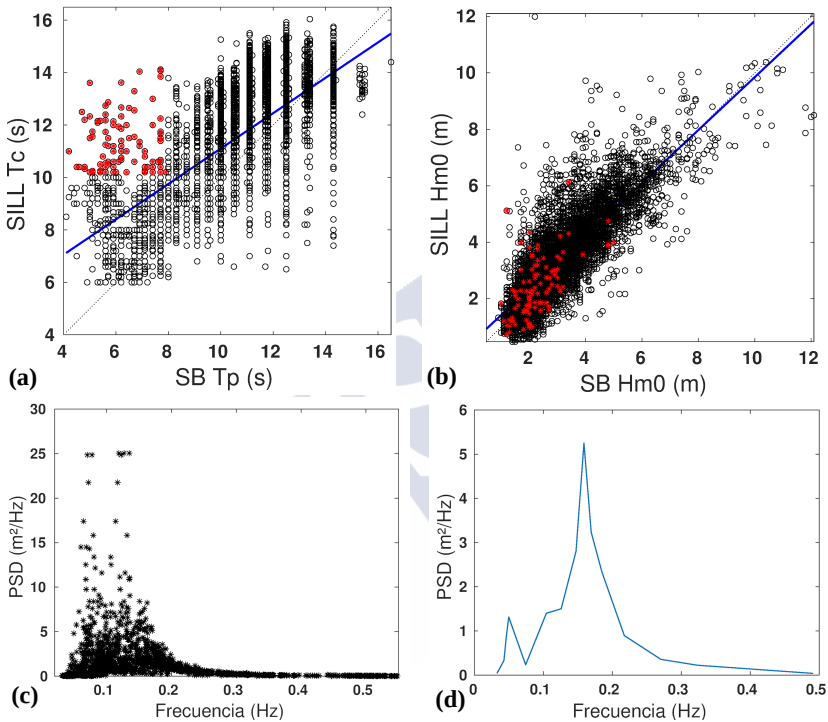


Figura 4.40: Datos en rojo correspondientes a las 105 muestras de SILL que sobreestiman el valor de T_p de SB representados sobre el diagrama de dispersión de T_p vs T_c (a) y el diagrama de dispersión de H_{m0} (b). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos. Representación de los 105 espectros de SB que corresponden a los datos marcados en rojo (c). Ejemplo del espectro generado por SB para uno de los casos (4/04/2014, 7 h) (d).

De nuevo, los espectros mostrados por la boya que corresponden a estos datos son muy particulares, mostrando dos picos de frecuencia muy marcados y separados (Figura 4.40 (c)), uno de los cuales corresponde a frecuencias muy elevadas y en ocasiones superiores al

límite de estimación de los radares (0,2 Hz) (Figura 4.40 (d)). Así, en la interpretación unimodal de dichos estados de mar por parte del radar, tanto el pico como el centroide de este se encontrarán desplazados hacia frecuencias más bajas, y por tanto periodos más elevados, que el del pico que la boya ha considerado para calcular T_p . Además, como se vio en la (Sección 4.2.), cuando la energía de los picos del espectro es similar, parece que las boyas tienen a considerar para el cálculo de T_p el correspondiente a una mayor frecuencia.

También se detectaron errores relevantes en la estimación de H_{m0} en la validación en función de los regímenes de oleaje, por lo que se procedió a un segundo análisis para confirmar la relación de dichos errores con ciertos rangos de H_{m0} y D_m de los datos del radar. Esto fue especialmente necesario en el caso de SILL, pues su grupo SO en general muestran muy baja correlación de H_{m0} y grandes MAPEs, pero solo las rosas de oleaje de SO6 muestran una clara discrepancia entre SILL y SB, y con la excepción de algunas muestras que no parecían ser datos espurios (Figuras 4.35 (g-i)).

La representación de los MAPES de H_{m0} entre VILA y VB, para cada combinación de H_{m0} vs D_m con resolución 1 m x 5° de las muestras de VILA (Figura 4.41), confirma los elevados errores para el oleaje equivalente a NE6 ($330^\circ \leq D_m < 90^\circ$ y $H_{m0} \geq 6m$). Por otro lado, se observa que los mayores errores del grupo NE2 (< 2 m) se concentran en el rango de oleaje del radar inferior a 1 m. Así, de cara a un posible cribado de estos datos, solo se consideraría el grupo NE6, por tener más relevancia los errores de este grupo, tanto por la elevada H_{m0} como por la discrepancia en la dirección antes mencionada. El tamaño muestral de NE6 es 29, el 0,68 % de los datos válidos de radar.

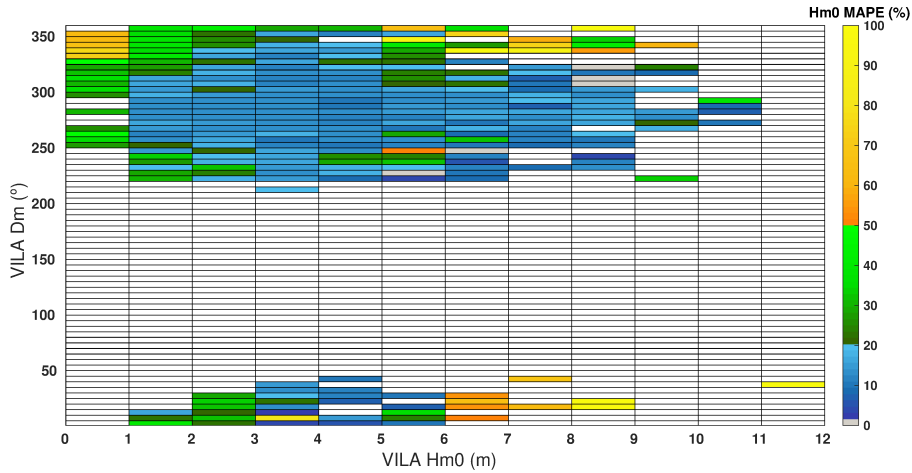


Figura 4.41: Representación de los MAPEs de H_{m0} entre VILA y VB, para cada combinación H_{m0} vs D_m de los datos de VILA (resolución $1\text{m} \times 5^\circ$).

En el caso de SILL, los mayores MAPEs se concentran de forma más destacada en el oleaje con $180^\circ \leq D_m < 260^\circ$ y $H_{m0} \geq 4\text{ m}$. Rangos que corresponderían a parte de los grupos SO4 y SO6 de SILL. Sin embargo, desde un punto de vista más conservador habría que considerar un rango algo más limitado, como sería direcciones entre 180° - 235° y $H_{m0} \geq 5\text{ m}$. Aun así, como se observa en la Figura 4.42 se podrían incluir algunas muestras con errores no excesivamente altos. No obstante, al comparar las rosas de oleaje de esta selección de datos con los correspondientes de SB (Figura 4.43), se observa que ya no se incluyen las muestras que no parecían ser claros espurios de grupo SO6 (Figura 4.35 (g-i)). El grupo de datos seleccionados consta de 117 muestras, el 1,87 % de los datos válidos de SILL.

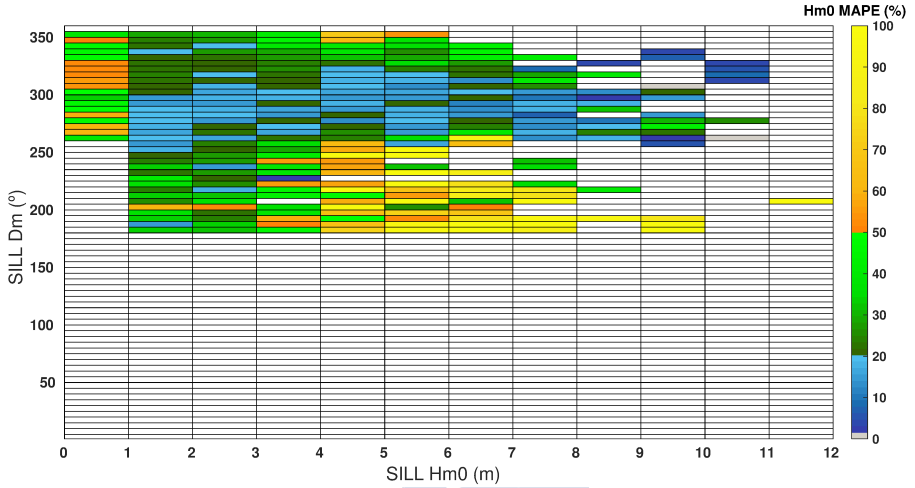


Figura 4.42: Representación de los MAPEs de H_{m0} entre SILL y SB, para cada combinación H_{m0} vs D_m de los datos de SILL (resolución 1m x 5°).

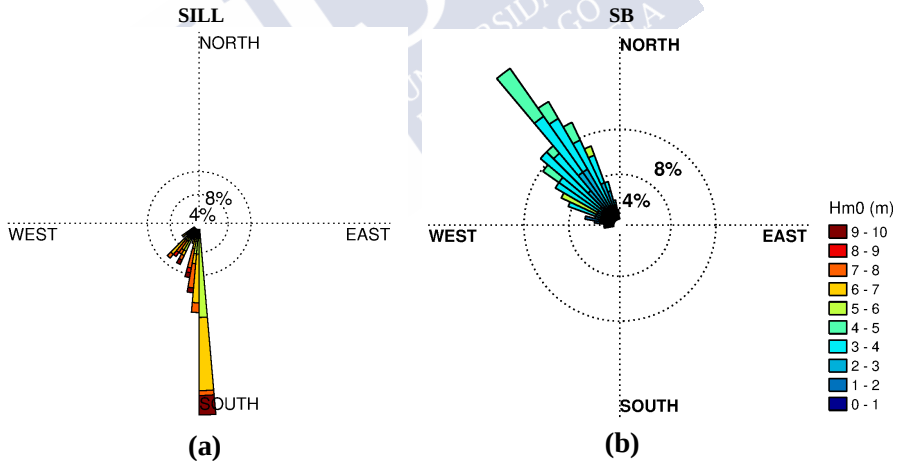


Figura 4.43: Rosas de oleaje de las muestras de SILL con $180^\circ \leq D_m < 235^\circ$ y $H_{m0} \geq 5$ m (a) y las muestras correspondientes de SB (b).

Puesto que la selección anterior de los posibles datos espurios se ha basado principalmente en los valores de H_{m0} de ambos radares, estos coinciden mayoritariamente con los puntos más dispersos y alejados de

la línea de regresión de H_{m0} entre boyas y radares (Figuras 4.44 (a), 4.45 (a)). Respecto al periodo, solo en el caso de SILL y SB coinciden con valores dispares entre radar y boya, en concreto, muestras en las que el radar sobreestima el valor de T_p (Figura 4.45 (b)). Como ya se vio en las rosas de oleaje las discrepancias respecto a D_m entre las boyas y los radares era muy obvia en estos datos seleccionados, y así se muestra también en los diagramas de dispersión de D_m de VILA y VB (Figura 4.44 (c)), y especialmente en el de SILL y SB, en el que los datos espurios coinciden con la nube de puntos que mostraba una gran discordancia entre ambos (Figura 4.45 (c)).

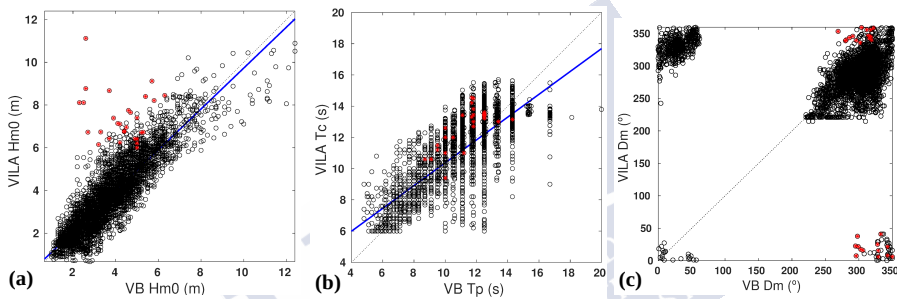


Figura 4.44: Diagramas de dispersión de H_{m0} (a), T_c vs T_p (b) y D_m (c) del RC 10 km de VILA y VB. Los puntos rojos corresponden a los datos de la selección de muestras de VILA con $330^\circ \leq D_m < 90^\circ$ y $H_{m0} \geq 6$ m. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.

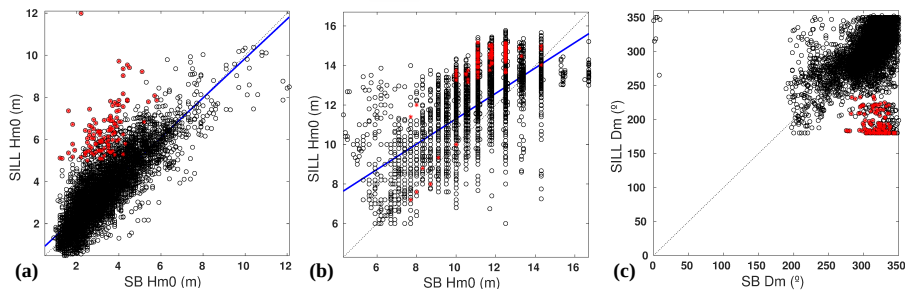


Figura 4.45: Diagramas de dispersión de H_{m0} (a), T_c vs T_p (b) y D_m (c) del RC 10 km de SILL y SB. Los puntos rojos corresponden a los datos de la selección de muestras de SILL con $180^\circ \leq D_m < 235^\circ$ y $H_{m0} \geq 5$ m. Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.

4.6. Tiempo de procesamiento del espectro de los radares

Para reducir el tiempo de procesamiento y con ello el retardo que se da entre la medición del oleaje y la generación de los parámetros finales, se ha evaluado la posibilidad de reducir el tiempo de datos, o lo que es lo mismo, el número de archivos CSS con 30 minutos de datos que se utilizan para el ajuste del modelo. Este, por recomendación de CODAR está configurado en 180 minutos. Así, se reprocesaron los datos de ambos radares cambiando la configuración a 90 y 120 minutos. Con 90 minutos no fue posible conseguir datos suficientes para describir el oleaje, por lo que solo se procedió con la validación de las series resultantes de usar 120 minutos.

Esta disminución de tiempo produjo en ambos radares una sensible pérdida de datos ($\approx 8\%$, Tabla 4.10 (a-b)), debido al incremento de más del 3% en el porcentaje de datos nulos, y en el caso de SILL también a la generación de un menor número de muestras durante el reprocesado (b). La máxima diferencia en la validación de los tres parámetros de oleaje (H_{m0} , T_c/T_p y D_m) para los 10 RCs de VILA, tanto de R como MAPEs, no pasó de un 3% . En el caso de SILL la diferencia entre algunos MAEs llegó al 5% , pero en términos absolutos esto no implicó más de un grado en el valor del MAE (Figuras 4.46, 4.47).

Tabla 4.10: Número de muestras cada 30 minutos y sin nulos de las series de datos procesados usando 120 y 180 minutos de VILA (a) y SILL (b).

Configuración	RCs									
(a) VILÁN	5km	10km	15km	20km	25km	30km	35km	40km	45km	50km
VILA 120	7.759	9.526	9.706	9.287	8.894	7.883	7.344	6.618	6.091	5.434
VILA 180	8.484	10.261	10.421	10.078	9.649	8.658	8.103	7.341	6.800	6.103

(b) SILLEIRO	5km	10km	15km	20km	25km	30km	35km	40km	45km	50km
SILL 120	11.705	14.476	14.896	14.091	13.682	12.623	12.373	11.457	11.058	10.283
SILL 180	12.520	15.137	15.555	14.811	14.370	13.326	13.050	12.259	11.764	11.080

Capítulo 4. VALIDACIÓN DATOS DE OLEAJE

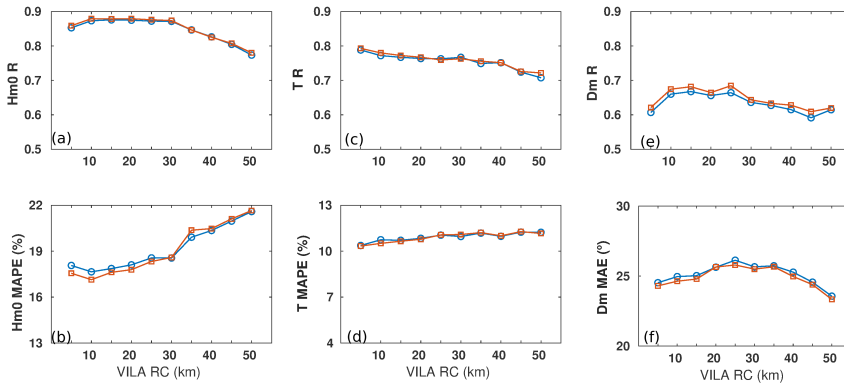


Figura 4.46: Validación de los datos de los 10 RCs de VILA con reprocesado de 180' (rojo) y 120' (azul) con VB. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) Media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m .

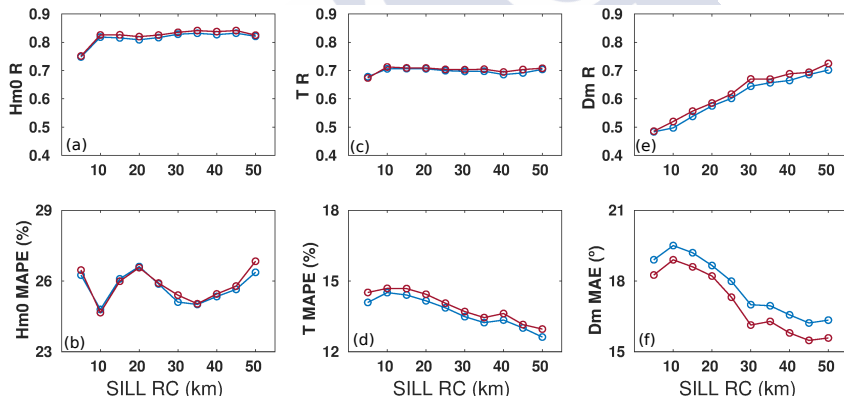


Figura 4.47: Validación de los datos de los 10 RCs de SILL con reprocesado de 180' (rojo) y 120' (azul) con SB. (a) R de H_{m0} ; (b) MAPE de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) MAE de D_m .

La validación entre los parámetros de oleaje del RC 10 km, para cada uno de los nueve grupos de oleaje descritos por VILA (Figura 4.48 (a-f)), resultó muy similar para ambas series de datos (180' y 120'), mostrándose también elevados errores para NE2 y NE6. Solo se detectaron algunas diferencias entre ambas series en el grupo NE6 y en

aquellos grupos con $H_{m0} < 2$ m (a,c). Y en el caso de D_m , para el grupo NO6, la versión reprocesada con 120' muestra una menor correlación, pero la misma MAE (e,f).

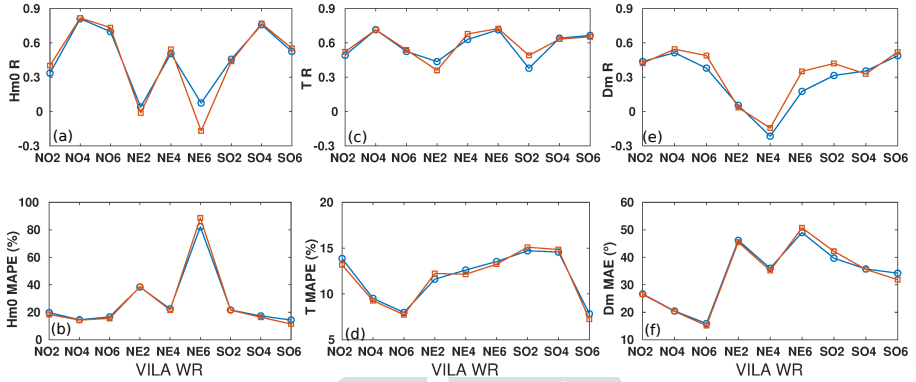


Figura 4.48: Validación de los datos de los 9 WR del RC 10 km de VILA con reprocesado de 180' (rojo) y 120' (azul) con VB. (a) R de H_{m0} ; (b) MAPE de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) MAE de D_m .

En el caso de SILL, el grupo de oleaje que más diferencias muestra, en perjuicio de la versión con reprocesado de 120', es el grupo NE6 que tan solo tiene 12 muestras (Figura 4.49 (a-f)).

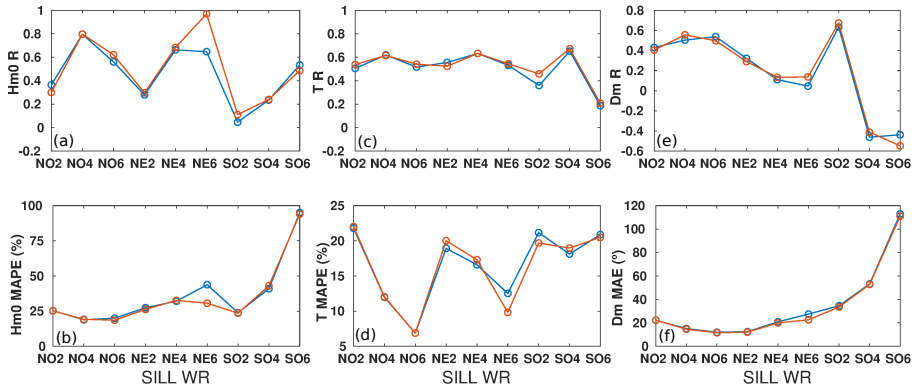


Figura 4.49: Validación de los datos de los 9 WR del RC 10 km de SILL con reprocesado de 180' (rojo) y 120' (azul) con SB. (a) R de H_{m0} ; (b) MAPE de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) MAE de D_m .

4.7. Modificación de los límites de costa

Dada la complejidad geográfica y la variabilidad del oleaje en la zona de Cabo Vilán, se analizó la posibilidad de modificar los límites de costa (CL) y de la dirección del oleaje (WB) durante el reprocesado de los espectros Doppler del radar (CSS), de tal forma que los RCs no incluyan zonas muy próximas a tierra y se reduzca la heterogeneidad de la batimetría y exposición al oleaje dentro de su área.

Según las recomendaciones de CODAR, para aquellos radares instalados en la costa y, por tanto, solo expuestos parcialmente al océano, el ángulo entre los CL debe ser entre 160° y 200° [108]. En teoría este ángulo abarca la exposición del radar al mar abierto y por tanto también se considera que incluye las posibles direcciones de procedencia del oleaje con periodos superiores a 6 s, pero esto último dependerá de las características geográficas y oceánicas locales [65].

Intentando seguir estas recomendaciones se reprocesaron los datos del radar VILA cambiando los CL para abarcar zonas más allá de la línea batimétrica de los 40 m (Figura 4.50), profundidad por debajo de la cual se iniciaría el efecto de las aguas someras que provoca la sobreestimación de la altura de ola calculada por el radar [102]. Además, se aplicaron tres WB diferentes, unos coincidentes con los CL (230° - 25°) y otros ampliando la libertad de la dirección del oleaje (200° - 50°), y una tercera versión coincidente con los mismos WB de la configuración actual del radar (221° - 41°). Las nuevas series de datos, detalladas a continuación, se validaron con los datos de VB y se compararon los resultados, incluyendo los de la configuración analizada en las secciones anteriores (VILA):

- VILA: CL = 221° - 41° . WB = 221° - 41° .
- VILA_230_221: CL = 230° - 25° . WB = 221° - 41° .
- VILA_230_230: CL = 230° - 25° . WB = 230° - 25° .
- VILA_230_200: CL = 230° - 25° . WB = 200° - 50° .

Todas las configuraciones abarcan el mismo periodo de datos utilizado en las secciones anteriores (enero 2014 – abril 2015). El número de datos válidos resultante de las nuevas configuraciones, salvo por diferencias de ± 5 muestras en algunas RCs, coincide con el de la configuración usada hasta ahora (Tabla 4.2). Por tanto, la modificación en los CL y WB aplicada no ha tenido incidencia en el porcentaje de datos nulos.

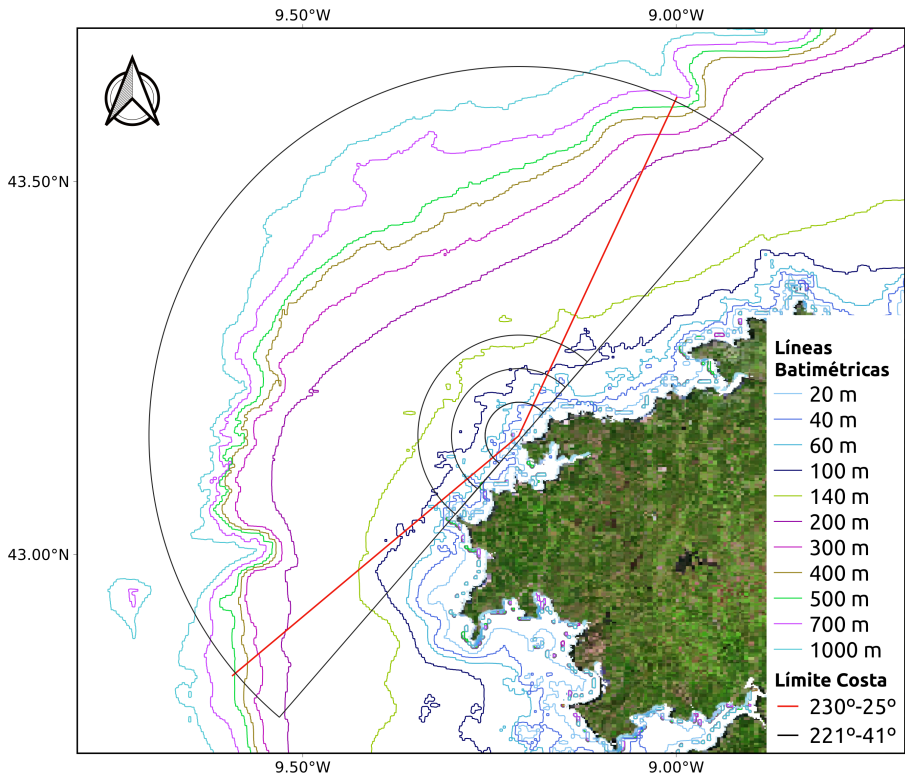


Figura 4.50: Entorno y zona de cobertura del radar VILA en Cabo Vilán con las líneas batimétricas. Los arcos delimitan los RCs 5 y 10 km y el total de la zona de cobertura del radar (55 km) con los límites de costa de radar (221°-41°). Las líneas rectas rojas indican los nuevos límites de costa (230°-25°). El triángulo verde representa VB.

En general las diferencias en el resultado de la validación de las cuatro configuraciones con VB no son significativas (Figuras 4.51 (a-f)). Solo en algunos casos se puede observar con claridad, que la configuración original (VILA) sigue siendo la que muestra mejor acuerdo con la boya, especialmente en el caso de la dirección (e,f). La siguiente configuración que tiene mejor resultado es VILA_230_230 pero solo hasta el RC 35 km, porque a partir de este, la configuración VILA_230_200 describe una R de H_{m0} y de D_m similar a la configuración VILA (a,e). Además, aunque es la que muestra el mayor valor de MAE de D_m para todos los RCs, también es la que más lo reduce a partir del RC 35 km (f).

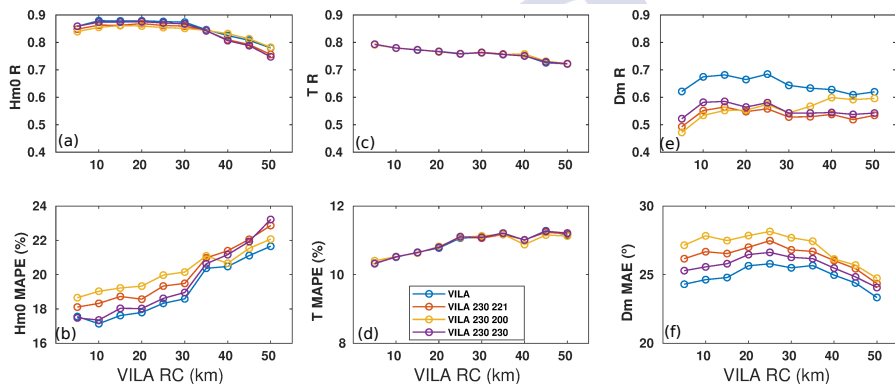


Figura 4.51: Validación de los datos de los 10 RCs de las 4 configuraciones del radar VILA con los datos de VB. (a) Índice de correlación lineal (R) de H_{m0} ; (b) Media del error absoluto porcentual (MAPE) de H_{m0} ; (c) R de T_c vs T_p ; (d) MAPE de T_c vs T_p ; (e) R de D_m ; (f) Error medio absoluto (MAE) de D_m .

A través de las rosas de oleaje (Figuras 4.52 (a-f)) se observa que en las nuevas configuraciones (c-f) la concentración de oleaje hacia el oeste es menos notable que en VILA, por lo que al igual que la boya (a), muestran el NO como el oleaje dominante. Sin embargo, también se observa que la dispersión de las nuevas rosas es mayor especialmente por un aumento en la proporción del oleaje NNO que no se da en la rosa de la boya.

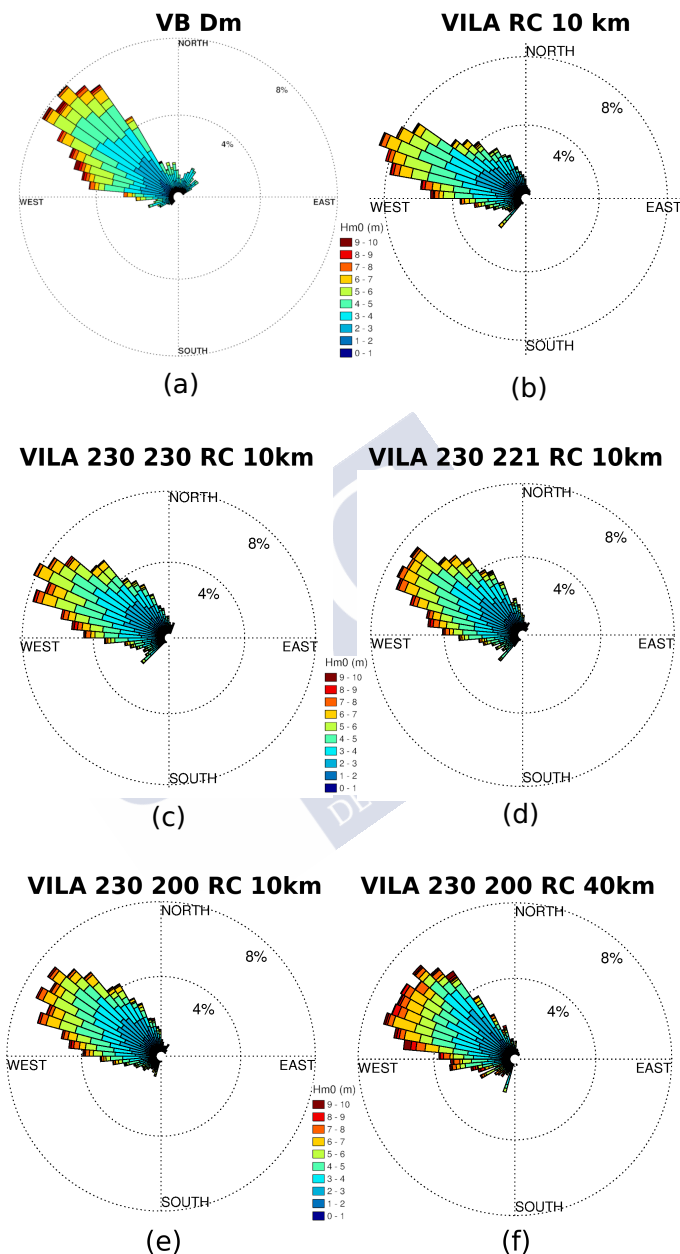


Figura 4.52: Rosas de oleaje de (a) VB en función de su D_m ; (b) VILA RC 10 km; (c) VILA_230_230 RC 10 km; (d) VILA_230_221 RC 10 km; (e) VILA_230_200 RC 10 km; (f) VILA_230_200 RC 40 km.

Por otro lado, en las nuevas configuraciones, la saturación en el CL sur se reduce en favor de datos con otras direcciones SO, más afines a lo que muestra la boya. La excepción a esto se da en el RC 10 km de la configuración VILA_230_200 (Figura 4.52 (e)) cuya saturación sur, aunque poco abundante, se desplaza hacia el nuevo WB (200°), aumentando también la proporción de datos con direcciones próximas que apenas muestra la boya. La rosa de oleaje del RC 40 km (Figura 4.52 (f)), que como se comentó antes es un punto de inflexión en la tendencia de esta configuración, tiene una distribución del oleaje especialmente abundante en un amplio rango de direcciones ONO, en perjuicio de las direcciones más norte y sur y también una mayor proporción de oleaje muy elevado ($H_{m0} > 6$ m) en comparación con el resto de las rosas de oleaje. Estas diferencias se deben principalmente a la falta de datos de oleaje pequeño o intermedio debido a los nulos. La única diferencia de esta configuración respecto a la otras es la mayor libertad de direcciones de oleaje (WB 200°–50°) lo que parece aumentar en cierto grado la similitud con la boya en los RCs más próximos a esta, pues al igual que la boya están expuestos a más direcciones.

4.8. Discusión

La mayor incidencia en la descripción del oleaje con los datos de los radares son los huecos generados por el elevado porcentaje de datos nulos. Estos se deben principalmente a la falta de señal en el espectro Doppler, por lo que no se generan los suficientes picos de segundo orden para poder estimar los parámetros de oleaje. En las características de estos radares ya está descrita la limitación para detectar oleaje de reducida altura o periodo [65, 67] y como se observa en los datos, la mayor pérdida de datos se da hasta los 2 m en ambos radares. Pero, especialmente en el caso de VILA, esta pérdida también se da en altos porcentajes (20-40 %) hasta los 5 m. Esto podría tener relación con un incremento en la señal de ruido o incluso podría deberse a interferencias, algo a lo que los radares que trabajan a 4,86 MHz son más sensibles [64, 75]. Las diferencias significativas en el porcentaje

de nulos entre ambos radares indica que, en el caso de VILA, esto último podría tener una incidencia mayor o algún otro factor técnico que reduzca la capacidad del radar para detectar la señal. Igualmente, la distancia al radar tiene incidencia en la pérdida de señal como se observa en el mayor porcentaje de datos nulos de los RCs más alejados. Respecto a esto, la excepción es el RC 5 km, que en ambos radares muestra mayor porcentaje de datos nulos que RCs más alejadas, probablemente por varios factores como la menor área de medida y la menor exposición al oleaje tanto por la dirección como por la pérdida de energía.

La falta de datos por nulos en los primeros rangos de H_{m0} , produce una desviación de la moda de su distribución entre los datos de las boyas y los distintos RCs de los radares (Figuras 4.11 (a,b)). También hay cierta pérdida de datos ligada a la dirección, como el oleaje cuya D_m está próximo o fuera de los WB de los radares (Figura 4.12), o cuya D_m es NNE y SO, que describen mayor porcentaje de nulos (Tablas 4.6,4.8). También se ve afectado el alcance de la validación estadística entre los parámetros de oleaje de radares y boyas, pues está condicionado al número de muestras válidas, lo que reduce casi a la mitad el tamaño muestral utilizado y también limita las características del oleaje que representan las muestras. Estas circunstancias son las que determinaron que solo se seleccionaran periodos de datos coincidentes de las boyas y radares de ambas zonas, con el fin de poder comparar los resultados de la validación de los datos de ambos radares, sin la influencia de los tipos de oleaje, como por ejemplo el invierno completo de 2014 que está disponible en los datos de la boya de Silleiro pero no en los de la boya Vilano-Sisargas.

Del resultado de validar los parámetros con todas las fuentes de datos utilizadas se confirma la mayor concordancia entre los datos de los radares y las fuentes más cercanas de datos, salvo en el caso de S02, cuya correspondencia con los datos de SILL solo es buena en el caso del periodo. La concordancia entre los datos de ambos radares no parece seguir una tendencia clara, y solo la R de H_{m0} es relativamente significativa (0,8). No obstante, esto es coherente con las diferencias también detectadas entre los T_p y D_m de las dos boyas (Figuras 4.5,4.7).

Al validar los 10 RCs de los radares con las respectivas boyas, en el caso de VILA, aunque las diferencias son muy pequeñas, se da un empeoramiento de la correlación con la boya con la distancia al radar, especialmente a partir del RC 35 km, no obstante, este empeoramiento coincide con las recomendaciones de CODAR respecto a utilizar solo hasta el séptimo RC (35 km) [101]. También, entre otras cosas, estaría motivado por el menor número de muestras de los RC más alejados, algo que en el caso de VILA es muy notable y reflejo de una baja sensibilidad del radar, que puede inducir significativas diferencias en los espectros de oleaje calculados para estas RCs más alejadas. En el caso de SILL se produce lo contrario, especialmente con D_m , que incrementa su correlación desde peores Rs que los mostrados por la D_m de VILA, para luego superarla ligeramente a partir del RC 40 km. En relación a esto, se puede observar que en el RC 10 km de SILL se producen más direcciones sur que SB, produciéndose una singular saturación de datos entre las direcciones 180° y 220° (Figuras 4.20 (a,b)), la cual desaparece en las RCs más alejadas, pero, por contra, para describir más direcciones norte que SB (Figuras 4.20 (c-f)). Esto estaría motivado por la mayor proximidad de los últimos RCs a la boya y tener a su vez una mayor exposición al oleaje norte (Figura 4.3). Además, la rectitud de la costa en la zona de Cabo Silleiro y el no estar influenciada por el oleaje del NE, a diferencia de la zona de Cabo Vilán, parece evitar el aumento de la heterogeneidad del oleaje a lo largo de los RCs más alejados [45]. Debido a esto y a la inclusión de datos de más inviernos, trabajos anteriores [49] con el RC 25 km de SILL arrojaron mejores resultados en la validación de este radar.

En el análisis más detallado de esta saturación descrita por el RC 10 km de SILL, se detectó que aquellas muestras con D_m entre 180° - 235° y $H_{m0} \geq 5$ m, podrían considerarse espurios por su elevado error tanto de D_m como de H_{m0} (Figuras 4.43, 4.45). VILA también describe una mayor concentración de datos con dirección sur que VB (Figuras 4.19, 4.20 (a)), pero no corresponden a errores relevantes respecto H_{m0} , ni siquiera en el caso de la saturación de datos en el CL sur de VILA (221° , Figura 4.31). Así, estas diferencias en la D_m respecto a VB parecen describir una tendencia general hacia direcciones

más oeste y sur, como se deriva también de la comparación entre las rosas de oleaje (Figuras 4.14 (a,b)). En la estimación de la dirección por parte de los radares se dan ciertos condicionamientos, como el uso del modelo cardioide [65] o un correcto ajuste del patrón de las antenas de los radares, que pueden influir en la baja correlación [109]. Pero también, se ve afectada por la complejidad del oleaje, como en los casos de oleajes bimodales con diferente dirección para los dos picos de energía, como se observó en los ejemplos de las Figuras 4.9, 4.10, o en las relevantes diferencias entre las D_m y D_p descritas por las boyas, especialmente en el caso de los regímenes de oleaje de los grupos NE y SO (Figuras 4.26, 4.28, 4.35). En la zona de Cabo Vilán además se da la circunstancia de que VILA no puede describir direcciones más hacia el este de 41° y VB muestra datos hasta $\approx 65^\circ$.

En general los valores de la R de H_{m0} entre los dos radares y las boyas (0,88 de VILA y 0,83 de SILL) parecen estar dentro de los rangos de otros trabajos realizados con radares Seasonde de otras zonas que además, trabajan con distintas frecuencias, así con un radar de 12-13 MHz Long, 2011 describió R_s entre 0,85-0,91 [68]; con un radar de 25 MHz Kohut, 2008 estimó valores algo más bajos, entre 0,65 y 0,71 [67] y Atan, 2014 en torno a 0,78 [110]. Por otro lado, se ha observado que tanto VILA como SILL tienden a infraestimar los valores extremos de H_{m0} (el oleaje más pequeño y el más elevado), mientras que describen cierta tendencia a sobreestimar el grueso de los datos intermedios, especialmente en el caso de SILL.

Respecto al periodo la correlación entre el T_c de los radares y el T_p de las boyas es bastante inferior a la de H_{m0} . Varios autores consideran que la menor correlación es esperable en general debido la utilización del periodo centroide (T_c) cuyo valor en muchas ocasiones no coincide con T_p y tampoco con T_m [45, 68, 74]. En este caso particular se ha observado que la correlación de T_c con T_p es inferior a con T_m y T_e , y sin embargo la coincidencia parece mayor con T_p cuando se observan los diagramas de dispersión (Figuras 4.21,4.22). A diferencia de lo que sucede con H_{m0} , los valores más bajos de T_p son claramente sobreestimados por el T_c de los radares, y en el caso de SILL esta sobreestimación y también la de los valores medios de T_p es

más relevante que la de VILA, algo que cobra mayor significación al comparar con T_m y T_e . Sin embargo, se da una excepción a esto, tanto en la validación de VILA como la de SILL, en un conjunto de datos de T_p que se separan significativamente de la línea de regresión por la infraestimación que ambos radares producen y que ha sido analizada en detalle en la Sección 4.5.

Son varias las circunstancias que pueden explicar algunas de estas diferencias entre la H_{m0} y periodos de las boyas y radares. En primer lugar, algunos de los valores más extremos de las H_{m0} de las boyas corresponden también a valores extremos de T_p que pueden quedar fuera del rango de medición de los radares que está entre 5–17 s (Figuras 4.21,4.22). Si se lleva esto al plano de los espectros unimodales, implica que el espectro utilizado por los radares para calcular H_{m0} tiene menor alcance y por tanto muy probablemente menor área de integración y menor H_{m0} resultante. Si la pérdida de área de espectro se da en el extremo de mayor frecuencia inducirá la sobreestimación del periodo y viceversa. Por otro lado, como se ha observado en los casos detallados en la Sección 4.5., cuando se dan estados de mar complejos que implica espectros bimodales del oleaje, se puede dar la infraestimación de H_{m0} , especialmente con oleaje poco energético (Figuras 4.38, 4.39) pero también su sobreestimación incluso perdiendo parte del espectro (Figura 4.40). Otros autores confirman la sobreestimación de H_{m0} , cuando se producen estados de mar bimodales que incluyen un oleaje de fondo (periodos elevados y poco dispersos) [76, 75]. Además, debe tenerse en cuenta, como se ha comentado en varias ocasiones, que el método de cálculo de los parámetros de oleaje por parte de los radares parte de la premisa de un oleaje uniforme a lo largo de los RCs, así como otros factores que pueden también alterar las estimaciones de boyas y radares como mareas, corrientes inerciales [45, 78] y subsuperficiales que, en el caso de las boyas, puede inducir una desviación hacia valores más bajos en la amplitud de las olas [79].

Los resultados del análisis en función del régimen de oleaje son ejemplo y consecuencia de los factores antes mencionados. El principal, la desviación en la estimación de la D_m de los radares respecto a las boyas, que hace que los nueve grupos analizados no sean coincidentes

según se haga la clasificación en función de los datos de unos u otros. Así, el uso de los resultados dependerá del objetivo que se tenga para los datos. En esta tesis se ha dedicado especial atención a la versión realizada en base a los datos de los radares para poder interpretarlos con independencia de otras fuentes de datos. Como resultado se puede interpretar, por ejemplo, que el oleaje SO mostrado por VILA puede ser considerado fiable respecto a H_{m0} , pero debe tenerse en cuenta que la dirección estimada podría ser errónea y considerarse la posibilidad de que sea un oleaje del ONO. La relevancia de este análisis dependerá de las necesidades de precisión especialmente respecto a la dirección. También con este análisis se detectaron rangos de oleaje con una elevada concentración de errores, como la ya mencionada saturación sur de SILL y también el grupo NE6 de VILA, ambos detallados y discutidos en la Sección 4.5.

La reducción del tiempo de procesamiento de los datos de los radares puede ser una ventaja para acercarlos a la definición de datos a tiempo real. Por otro lado, el tiempo de datos promediados, para el cálculo de los parámetros de oleaje, es importante para depurar la señal respecto al ruido y evitar pérdida de muestras por nulos, así como ganar estabilidad en los datos [45, 66]. Los resultados de reducir una hora el tiempo de procesamiento (de 180' a 120') confirmaron tanto una pérdida de datos por nulos como un ligero descenso en la concordancia con los datos de la boyas. De nuevo, será el uso final de los datos el que determinará la prioridad entre tiempo o calidad y cantidad de datos.

Con la reducción de los límites de costa de 221°–41° a 230°–25° se ha buscado evitar la línea batimétrica de los 40 m, por debajo de la cual los radares que trabajan a frecuencias inferiores a 5 MHz podrían verse afectados provocando la sobreestimación de H_{m0} [102]. En el resultado no se detectó ninguna mejoría a este respecto (Figuras 4.51(a-b)). Por otro lado, se experimentó con la posibilidad de aumentar los rangos de direcciones (WB) hasta los 200° y 50° y se obtuvieron resultados significativos en el caso de las RCs más alejadas (Figuras 4.51 (a,e)), debido principalmente a esta libertad en la dirección que se acerca al rango de direcciones de la boyas. En general la modificación de los CL parece reducir la tendencia de la D_m de VILA hacia direcciones más O

y SO (Figuras 4.52 (a-f)), pero esta mejoría no parece respaldada por los resultados de la validación estadística, pues ninguna de las nuevas configuraciones mostró mayor acuerdo con la boya que la configuración actual del radar y analizada durante esta Tesis (Figuras 4.51 (a-f)).



Capítulo 5

EVALUACIÓN DEL RECURSO UNDIMOTRIZ

Este capítulo incluye contenido del siguiente artículo:

Basañez, A.; Pérez-Muñuzuri, V. HF Radars for Wave Energy Resource Assessment Offshore NW Spain. *Remote Sens.* **2021**, *13* (11), 2070. Ed. MDPI, ISSN: 2072-4292. Coautor: Vicente Pérez Muñuzuri (Universidad de Santiago de Compostela).

Teniendo en cuenta las limitaciones, pero también las ventajas de los radares HF como dispositivos de medida del oleaje, se ha procedido a analizar su aplicación en la evaluación del recurso undimotriz. Para dar mayor cobertura a este análisis se han utilizado todos los datos disponibles de las fuentes de las zonas de Silheiro (radar SILL, boya SB y el punto SIMAR 68) y Vilán (radar VILA, boya VB y el punto SIMAR 28) (Figura 5.1). También se han utilizado los datos del modelo WW3. No obstante, teniendo en cuenta la diferencia en los periodos de datos disponibles para ambas zonas (Figura 3.5) y la interdependencia entre las condiciones del oleaje y la abundancia e incluso la calidad de los datos, se decidió analizar de forma independiente ambas zonas. Así, al no buscar la comparación, se ha podido aprovechar el máximo de muestras. Respecto a los datos de los radares, a partir de 2015 los datos utilizados fueron los generados en los radares y por tanto el alcance

utilizado se limita a los 5 primeros RCs (hasta 30 km). En el caso de VILA, se confirmó que los datos de 2018 en adelante fueron procesados por la nueva versión del software, la misma utilizada para los datos de la validación anterior (Capítulo 4). También se marcaron como fallos las muestras que cumplían las condiciones descritas en la Sección 4.5. como espurios:

- VILA: D_m NNE ($330^\circ - 90^\circ$) y $H_{m0} \geq 6m$
- SILL: D_m SSO ($180^\circ - 235^\circ$) y $H_{m0} \geq 5 m$.

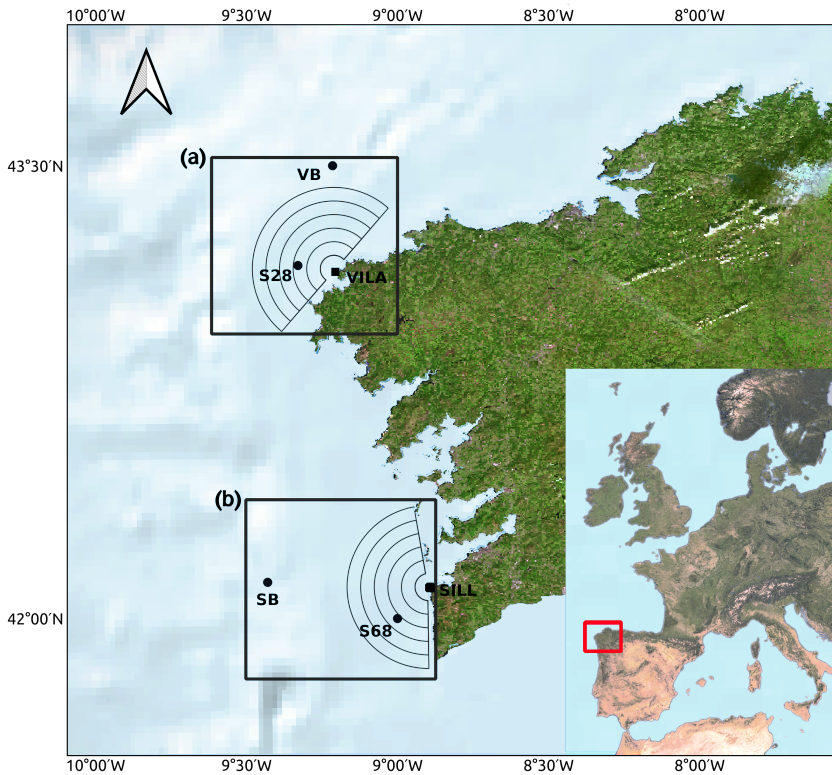


Figura 5.1: Noroeste de la costa gallega con las áreas de estudio de Vilán (a) y Silleiro (b). Las fuentes de datos indicadas en la figura son la Boya Vilano-Sisargas (VB), el radar de Vilán (VILA) y sus 5 primeros RCs, los puntos SIMAR 3004028 (S28) y 1044068 (S68), la boya Silleiro (SB), el radar de Silleiro (SILL) y sus 5 primeros RCs.

Las dos áreas de estudio, especialmente en lo que respecta a WW3, se centrarán en las limitadas por los rectángulos de la Figura 5.1, y los periodos de datos utilizados de cada zona son los que se detallan a continuación:

- Zona Vilán: 01/01/2014 - 30/04/2015 + 01/01/2018 - 07/10/2020.
- Zona Silheiro: 01/01/2014 - 28/07/2019 + 01/08/2020-07/10/2020.

En la Tabla 5.1 está detallado el número de muestras horarias brutas disponibles de cada fuente de datos, así como el número ideal de muestras horarias que corresponderían a cada periodo de tiempo. En el caso de los radares el número de muestras corresponde a una frecuencia de 30 minutos y se detalla el porcentaje de nulos respecto al total. En todos los casos se diferencia entre el total de muestras y la suma agregada de cada estación del año de todo el periodo (primavera: abril, mayo y junio; verano: julio, agosto y septiembre; otoño: octubre, noviembre y diciembre e invierno: enero, febrero y marzo).

Tabla 5.1: Número de muestras horarias disponibles de las boyas y puntos SIMAR (VB, SB, S28, S68). Número ideal de muestras horarias para cada periodo de datos. Número de muestras cada 30' del RC 10 km de los radares (VILA, SILL) y el porcentaje correspondiente de datos nulos. El número de muestras correspondientes al modelo WW3 es igual al del número ideal de muestras horarias.

(a) VILÁN					
Datos	S28	VB	Nº Ideal Muestras	VILA 10 km	Nulos
Total	35.666	33.637	35.879	63.839	51,05 %
Primavera	9.420	9.059	9.456	15.742	55,72 %
Verano	8.737	8.759	8.832	13.858	71,40 %
Otoño	6.734	6.768	6.767	13.497	45,05 %
Invierno	10.775	9.051	10.824	20.742	37,81 %

(b) SILLEIRO					
Datos	S68	SB	Nº Ideal Muestras	SILL 10 km	Nulos
Total	50.377	49.596	50.471	95.202	39,38 %
Primavera	13.092	13.053	13.104	25.280	46,01 %
Verano	13.188	12.377	13.199	25.891	57,01 %
Otoño	11.173	11.183	11.184	19.770	29,41 %
Invierno	12.924	12.983	12.984	24.261	21,79 %

5.1. Validación estadística de la potencia undimotriz

Para mostrar las diferencias netas en la estimación del recurso undimotriz entre las distintas fuentes de datos, se ha realizado la validación de la potencia y energía undimotriz, para lo cual solo se han utilizado los datos válidos, reduciéndose considerablemente el tamaño muestral, dado el porcentaje de nulos en los datos de los radares (Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Muestras válidas comunes a todas las fuentes de datos de cada área.

(a) VILÁN		(b) SILLEIRO	
Datos limpios emparejados		Datos limpios emparejados	
Total	13.724	Total	27.486
Primavera	3.210	Primavera	4.656
Verano	1.849	Verano	6.618
Otoño	3.650	Otoño	6.891
Invierno	5.015	Invierno	9.321

En los resultados de la validación presentada en la Sección 4.4.2., se confirmó la concordancia entre la H_{m0} de boyas y radares, pero también cierta sobreestimación excepto para los valores más pequeños y los más grandes de las boyas. En el caso de T_p se estableció que, salvo las excepciones comentadas, en general el T_c tiende a sobrestimar el T_p de las boyas. Al compararlo con T_e , que es el más utilizado en la evaluación de recurso undimotriz, se detectó una mayor correlación, aunque los valores se desviaban completamente hacia mayores valores de T_c . Sin embargo, al aplicar el factor de conversión a T_c (0,8572) para obtener el T_e de los radares, se ha observado que la similitud entre los datos de VILA y VB aumenta (Figura 5.2 (a)). En el caso de SILL la concordancia también es algo mayor, pero manteniendo la elevada sobreestimación (Figura 5.2 (c)). En el caso de los puntos SIMAR, el T_e calculado infraestima los valores menores de ≈ 8 s de T_e de las boyas, pero después, cuanto mayor es T_e mayor es la sobreestimación de SIMAR (Figura 5.2 (b,d)). La energía undimotriz calculada con las tres fuentes de datos (radares, boyas y puntos SIMAR) se ha comparado por año y por cada estación del año (Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6). También se ha validado la potencia undimotriz del total de datos y del agregado de cada estación del año (Tablas 5.3,5.4).

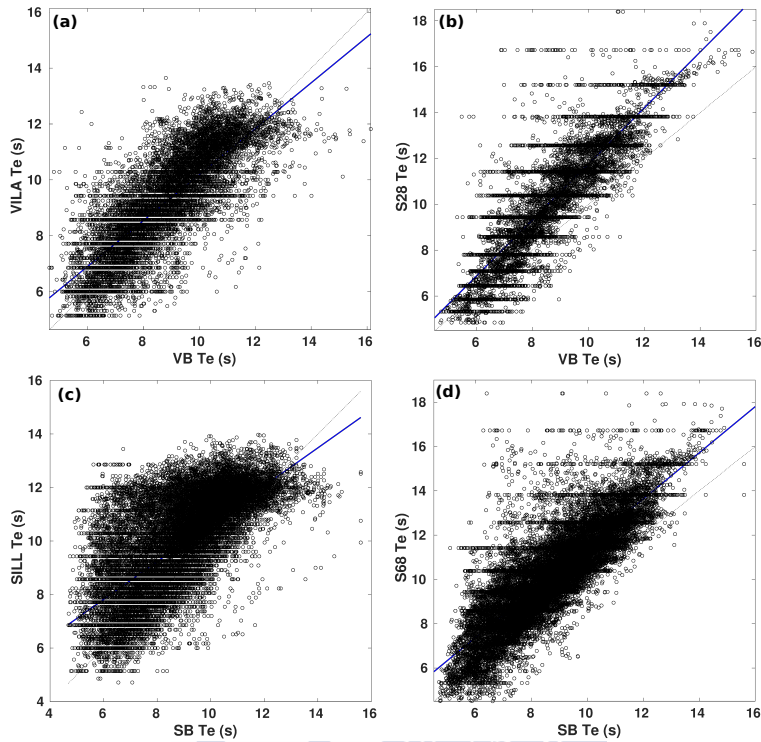


Figura 5.2: Diagramas de dispersión del periodo energético (T_e) de VB vs RC 10 km de VILA (a) y S28 (b). Y de SB vs RC 10 km de SILL (c) y S68 (d). Las líneas azules son las líneas de regresión entre los pares de datos.

VILA muestra una ligera sobreestimación de la energía anual respecto a VB (Figura 5.3), pero no parece seguir una tendencia clara respecto a las estaciones del año (Figura 5.4). Sin embargo, las medias de potencia estacional muestran que esta sobreestimación es relativamente mayor en primavera y verano (Tabla 5.3). Algo parecido sucede al comparar S28 con VB. Por otro lado, aunque las medias de las potencias de VILA y S28 son similares, los RMSE entre estos son mayores que respecto a VB.

Tabla 5.3: Potencias medias y raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las series de datos (VB, S28 y VILA).

VILÁN				
Estadísticos Potencia Undimotriz (kW/m)				
Datos		MEDIA	RMSE vs VB	RMSE vs S28
Total	VB	67,00	—	—
	S28	69,48	29,37	—
	VILA	71,76	41,73	44,17
Primavera	VB	32,47	—	—
	S28	37,34	15,88	—
	VILA	39,18	23,75	23,20
Verano	VB	22,47	—	—
	S28	22,95	8,74	—
	VILA	24,83	19,54	20,63
Otoño	VB	84,06	—	—
	S28	87,92	33,18	—
	VILA	93,70	47,93	52,14
Invierno	VB	92,91	—	—
	S28	93,79	37,00	—
	VILA	93,95	49,93	52,58

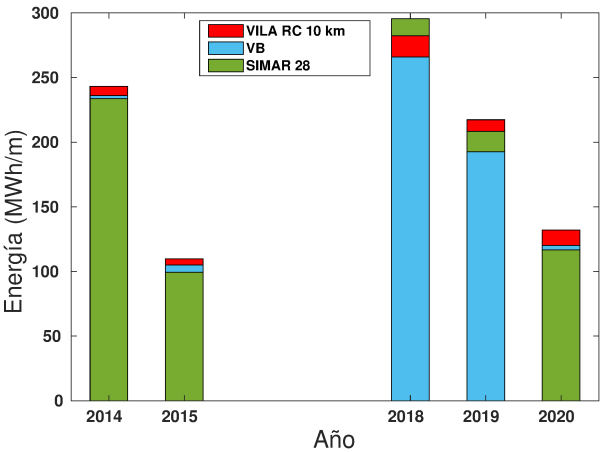


Figura 5.3: Barras superpuestas de la energía undimotriz total por año, de VILA RC 10 km (rojo), VB (azul) y S28 (verde).

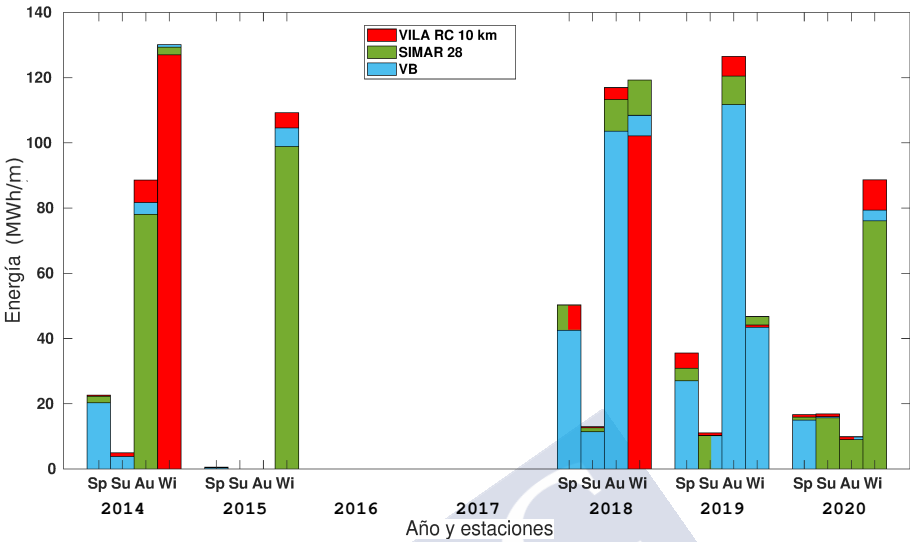


Figura 5.4: Barras superpuestas de la energía undimotriz total por estación del año, de VILA RC 10 km (rojo), VB (azul) y S28 (verde). Sp: primavera; Su: verano; Au: otoño; Wi: invierno.

La energía estimada con SILL es siempre mayor que la estimada con SB y S68 (Figura 5.5). Proporcionalmente la menor sobrestimación parece darse en invierno y la mayor en otoño (Figura 5.6). Sin embargo, al analizar las medias de la potencia (Tabla 5.4), es en verano y primavera cuando SILL muestra la mayor diferencia con la boya. Salvo en la primavera de 2018, la energía estimada con los datos de S68 es siempre menor que SILL y SB, algo que también confirman las medias de la potencia (Tabla 5.4).

Tabla 5.4: Potencias medias y raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre las series de datos (SB, S68 y SILL).

SILLEIRO				
Estadísticos Potencia Undimotriz (kW/m)				
Datos		MEDIA	RMSE vs SB	RMSE vs S68
Total	SB	54,39	—	—
	S68	45,14	28,87	—
	SILL	66,00	40,02	46,57
Primavera	SB	29,97	—	—
	S68	27,33	14,59	—
	SILL	40,36	27,94	30,76
Verano	SB	19,22	—	—
	S68	15,36	9,37	—
	SILL	29,40	24,69	27,54
Otoño	SB	60,74	—	—
	S68	49,44	27,92	—
	SILL	76,76	44,23	53,13
Invierno	SB	84,61	—	—
	S68	69,48	41,07	—
	SILL	94,51	49,17	57,07

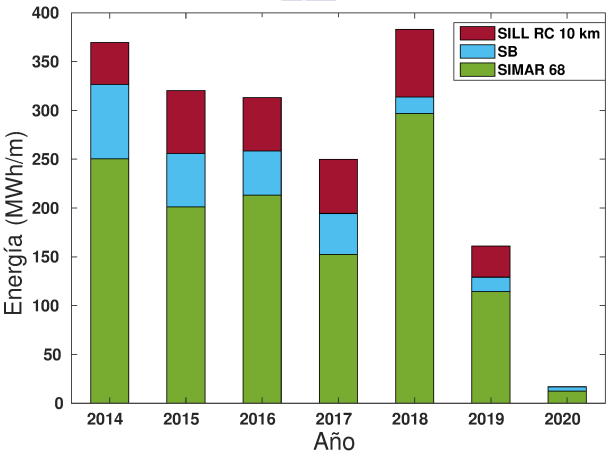


Figura 5.5: Barras superpuestas de la energía undimotriz total por año, de SILL RC 10 km (rojo), SB (azul) y S68 (verde).

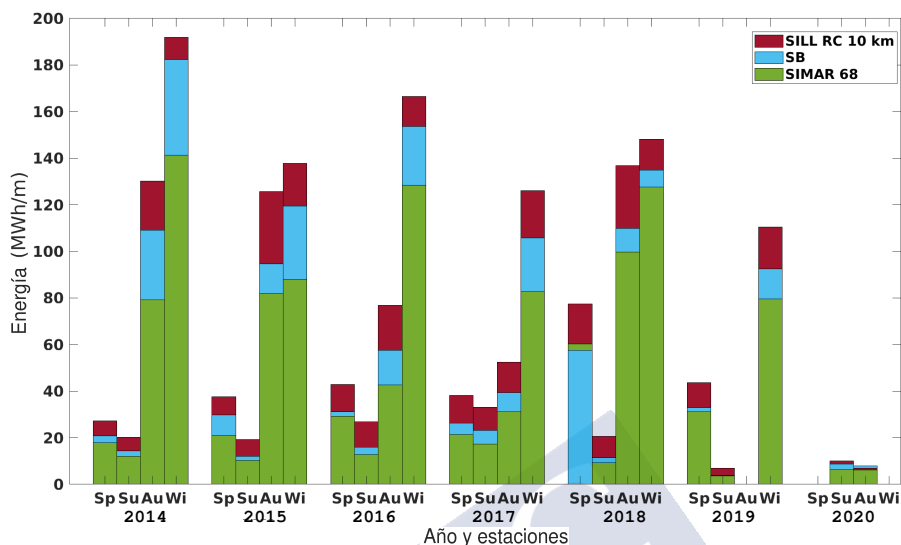


Figura 5.6: Barras superpuestas de la energía undimotriz total por estación del año, de SILL RC 10 km (rojo), SB (azul) y S68 (verde). Sp: primavera; Su: verano; Au: otoño; Wi: invierno.

5.2. Descripción del recurso undimotriz

Para la evaluación del recurso undimotriz se utilizaron las series de datos brutas emparejadas de radares, boyas y puntos SIMAR. A diferencia del caso anterior incluyen los nulos de los radares y las muestras marcadas por los filtros de calidad. Como en la práctica los cálculos se realizaron solo con las muestras válidas, el tamaño de las series de datos es diferente para las tres fuentes de datos (Tabla 5.5). Con este método, además de otras diferencias, se busca detectar la incidencia de la pérdida de datos, especialmente de los radares, en la estimación del recurso energético. También hay cierta pérdida de datos en el total de muestras emparejadas, respecto al número ideal de cada periodo de tiempo (Vilán 35.879, Silleiro 50.471, Tabla 5.1), debido a los pequeños huecos en las series de datos tanto de las boyas como de los radares.

Tabla 5.5: Datos brutos emparejados de cada área, Vilán (a), Silleiro (b), y datos limpios correspondientes a cada fuente de datos (sin nulos ni fallos). El tamaño muestral de WW3 coincide con el de los puntos SIMAR.

(a) VILÁN				(b) SILLEIRO			
Datos brutos emparejados: 29.578.				Datos brutos emparejados: 46.475.			
Datos válidos				Datos válidos			
datos	S28	VILA RC 10 km	VB	datos	S68	SILL RC 10 km	SB
Total	29.578	13.770	29.537	Total	46.475	27.856	45.768
Primavera	7.439	3.224	7.425	Primavera	12.501	6.627	12.488
Verano	6.819	1.859	6.814	Verano	12.076	4.997	11.412
Otoño	6.723	3.657	6.718	Otoño	9.848	6.898	9.835
Invierno	8.597	5.030	8.580	Invierno	12.050	9.334	12.033

El recurso undimotriz, en base a las tres fuentes de datos, se ha descrito mediante matrices de energía (Figuras 5.7, 5.8). Para poder compararlas se ha utilizado, como referencia para el cálculo de los porcentajes de ocurrencia, el número ideal de muestras de cada zona (ver Métodos). Las diferencias más relevantes, debidas principalmente a la gran pérdida de datos de los radares por nulos, son los bajos valores de ocurrencia y los altos valores de las líneas de potencia (percentiles). También, la limitación de los radares para estimar oleajes con periodos comprendidos entre 5-17 s determina que T_e se limite al rango entre 3,43–14,57 s (Figuras 5.7 (b), 5.8 (b)).

A parte de estas diferencias generales, en las matrices de las fuentes de la zona de Vilán (Figuras 5.7 (a-c)), se puede ver que mientras los valores de H_{m0} de VB se incrementan progresivamente hasta su valor máximo de T_e (17 s) (c), en la matriz del radar los valores máximos de H_{m0} se concentran en torno al T_e de 11 s (b). La matriz de S28 (a), muestra un mayor rango de valores de T_e (entre los 3 y los 19 s) y una significativa desviación de los porcentajes de ocurrencia hacia periodos más grandes, pero H_{m0} menores que VB y VILA. Esto determina que las líneas de potencia de los percentiles más bajos sean ligeramente mayores que las de VB y por el contrario la del percentil 99 % tenga

un valor menor.

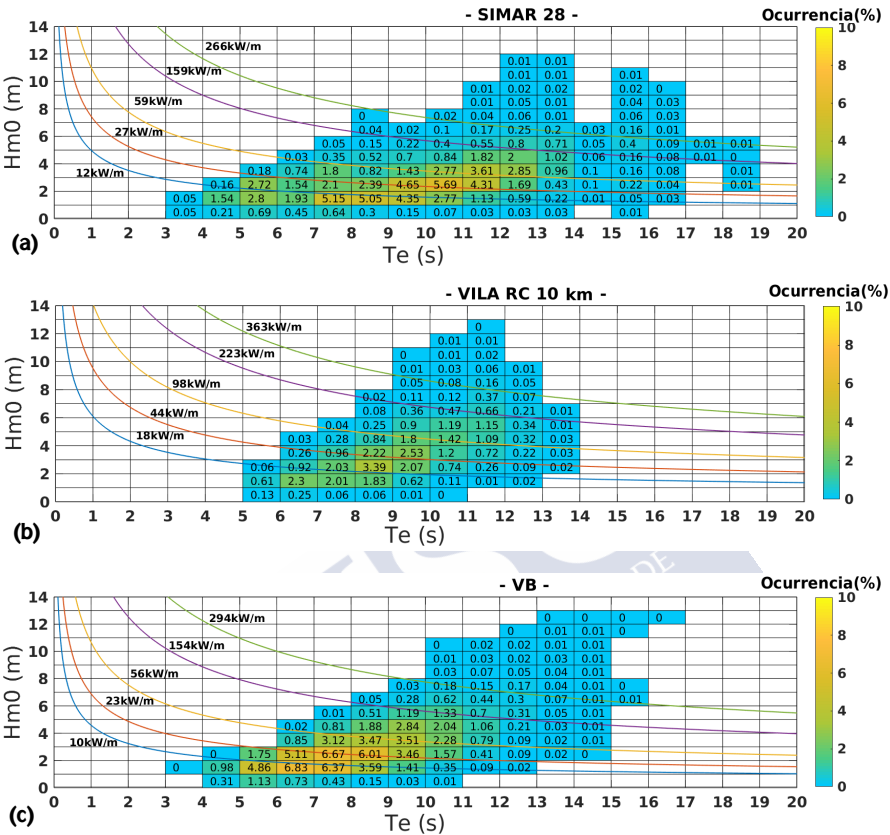


Figura 5.7: Matrices de energía de S28 (a), VILA RC 10 km (b) y VB (c). Los números y colores son porcentaje de ocurrencia. Líneas de potencia de los percentiles 25, 50, 75, 90 y 99 %.

Las matrices de la zona de Silleiro (Figura 5.8 (a-c)) muestran que, respecto a la boya, SILL tiene mayores porcentajes de ocurrencia entre los 11-13 s y también de oleaje con $H_{m0} > 8$ m; En el caso de la matriz de S68 la distribución de los porcentajes de ocurrencia está también desplazada hacia valores más elevados de T_e , pero describe menor abundancia de $H_{m0} > 4$ m, no llegando a alcanzar los valores máximos de H_{m0} de la boya y el radar. Esto se refleja en que sus líneas de potencia también corresponden a valores más bajos.

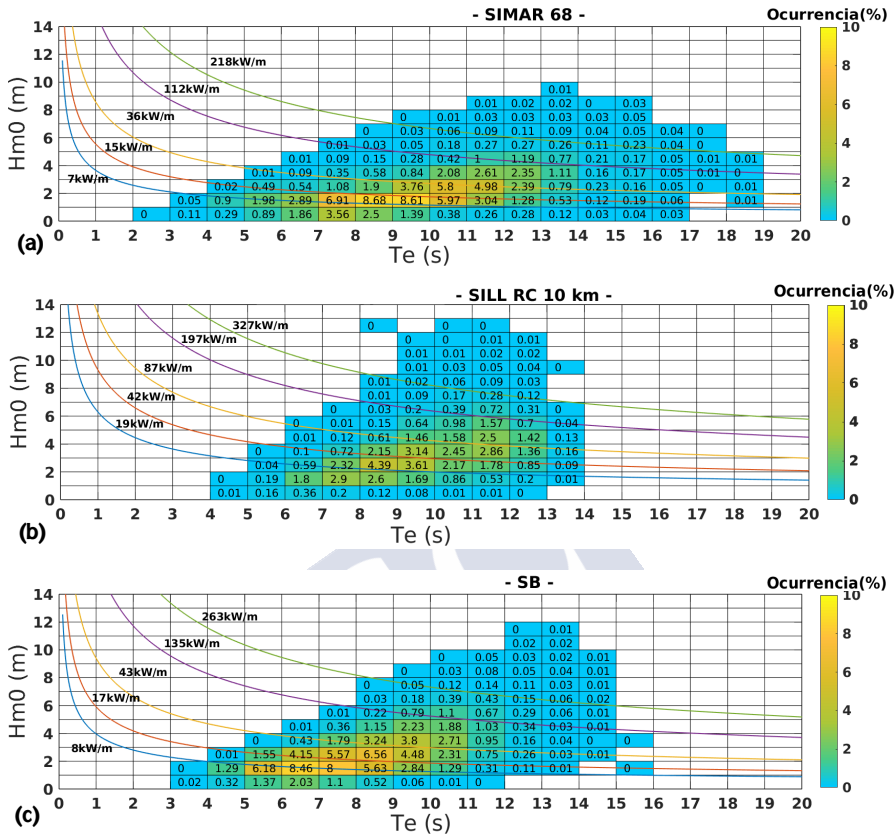


Figura 5.8: Matrices de energía de S68 (a), SILL RC 10 km (b) y SB (c). Los números y colores son porcentaje de ocurrencia. Líneas de potencia de los percentiles 25, 50, 75, 90 y 99%.

Como cabía esperar, dada la menor cantidad de datos de VILA respecto a VB (13.770 vs 29.537, Tabla 5.5), la estimación de la energía media undimotriz (E_m) del radar es menor que la estimada con la boya, tanto la anual (-26%) como la del resto de estaciones del año, especialmente en verano (\approx -50%). Por el contrario, la estimada con los datos de S28 es la más elevada, especialmente en primavera y verano (+19% y +14%, respectivamente) (Tabla 5.6 (a)). En contraste, SILL, aun con muchos menos datos que SB (27.856 vs 45.768, Tabla 5.5) describe la E_m más elevada, dándose la mayor diferencia

respecto a la boya en otoño (+15,2%). Esto revela la importancia de la sobreestimación que se detectó en la validación anterior (Figura 5.5). Las *Em* estimadas con S68 son inferiores a las de la boya, especialmente en los periodos más energéticos (otoño e invierno, -18,10% y -17,39% respectivamente) (Tabla 5.6 (b)).

Tabla 5.6: Energía undimotriz media (*Em*) anual y por estación del año en las zonas de Vilán (a) y Silheiro (b) . Los datos de los radares corresponden a los RCs 10 km.

(a) VILÁN				(b) SILLEIRO			
<i>Em</i> (MWh/m)				<i>Em</i> (MWh/m)			
Datos	S28	VILA	VB	Datos	S68	SILL	SB
Anual	343,28	240,80	325,75	Anual	246,52	316,83	292,75
Primavera	45,54	29,24	38,39	Primavera	37,94	44,70	41,97
Verano	25,93	11,42	22,70	Verano	20,28	24,23	22,39
Otoño	145,47	110,81	138,27	Otoño	73,72	103,69	90,01
Invierno	132,58	95,42	131,44	Invierno	117,18	148,84	141,84

Al analizar la dirección utilizando los datos emparejados brutos (Tabla 5.5) se ha detectado que en verano, especialmente en el caso de la zona de Vilán, se da una drástica variación en la dirección dominante, dejando de ser NO para extenderse, según los datos de VB, desde el NO hasta el E (Figura 5.9 (c)). Sin embargo, en la Figura 5.9 (b) se observa como el radar, aunque con cierto incremento relativo de las direcciones N, sigue describiendo como predominantes las direcciones entre el O y el NO. El punto SIMAR, al igual que la boya muestra una predominancia de direcciones NNE, aunque no pasa de aproximadamente los 30° (Figura 5.9 (a)). Debe tenerse en cuenta que esta diferencia de VILA se debe principalmente a que la mayoría de las muestras de VB y S28 corresponden a datos nulos del radar.

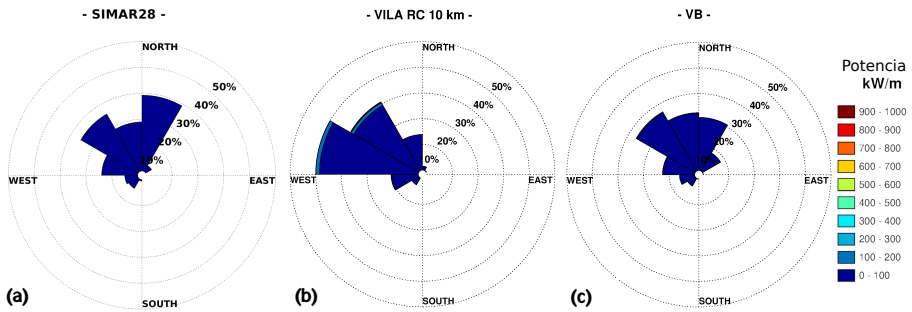


Figura 5.9: Rosas de potencia de oleaje con datos de los veranos de S28 (a), VILA RC 10 km (b) y VB (c).

En la zona de Silleiro aunque se mantiene la clara predominancia del oleaje NO, tanto la boya como el radar describen un incremento del porcentaje de muestras con dirección norte ($330^\circ - 0^\circ$), mientras que el punto SIMAR sigue sin mostrar prácticamente datos con esa dirección (Figura 5.10).

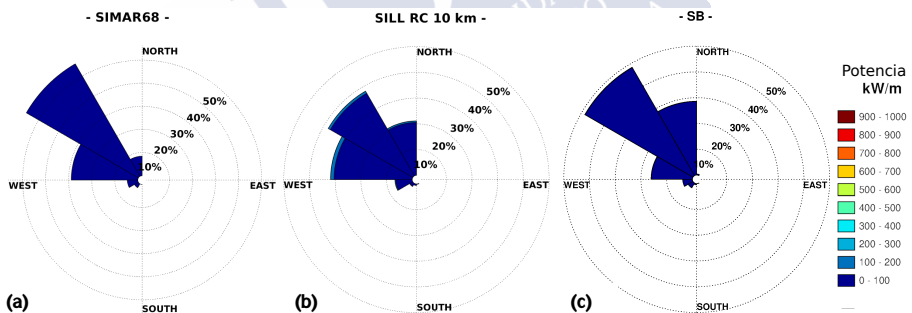


Figura 5.10: Rosas de potencia de oleaje con datos de los veranos de S68 (a), SILL RC 10 km (b) y SB (c).

Para analizar y validar la variabilidad espacial de la Em a lo largo de los 5 RCs de los radares, se recurrió al modelo WW3 cuya cobertura y resolución (≈ 5 km) coincide con la de los radares. En primer lugar, se ha realizado una comparación visual mediante los mapas de las Figuras 5.12, 5.11.

En ambas zonas el modelo estima valores de Em más elevadas que el resto de las fuentes de datos, excepto SILL, que muestra en general

valores muy parecidos, salvo en verano donde se nota especialmente la pérdida de datos por nulos (Figura 5.12 (h)). Como era de esperar los datos de WW3 muestran un gradiente positivo de la energía con el aumento de la distancia a la costa y con una disposición en áreas paralelas a esta. Esto destaca la limitación que supone para los radares realizar las mediciones en arcos que abarcan zonas con diferentes posiciones relativas a la línea de costa y por tanto diferente batimetría. A pesar de esto se puede observar que a lo largo de la bisectriz de los RCs se da también esta gradación positiva, con algunas excepciones como en el caso VILA, la última RC en otoño (Figura 5.11 (i)) y las dos últimas del dato anual (Figura 5.11 (f)) y en el caso de SILL en primavera (Figura 5.12 (g)). Es probable que esta pérdida de energía se vea influenciada por el mayor porcentaje de nulos de las RCs más alejadas.

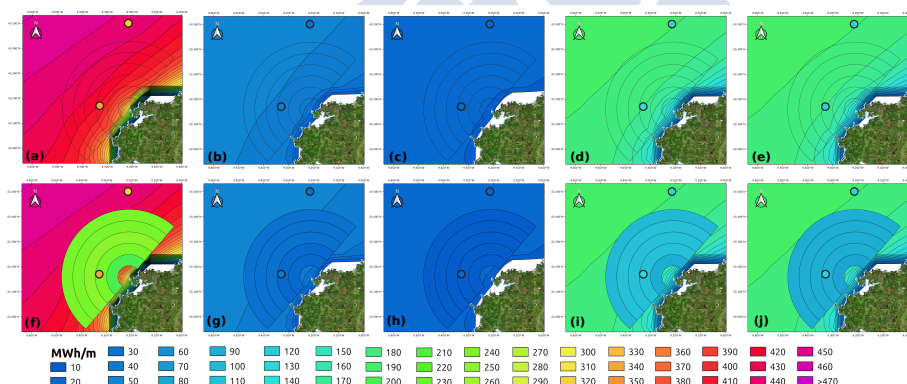


Figura 5.11: Energía media anual (a, f) y por estación de la zona de Vilán: primavera (b,g), verano (c,h), otoño (d,i) e invierno (e,j). Fondo con los datos de WW3. S28 y VB representados con un círculo. Los arcos negros corresponden a los 5 RCs de VILA, pero solo se muestran sus datos de E_m en la línea inferior (f-j).

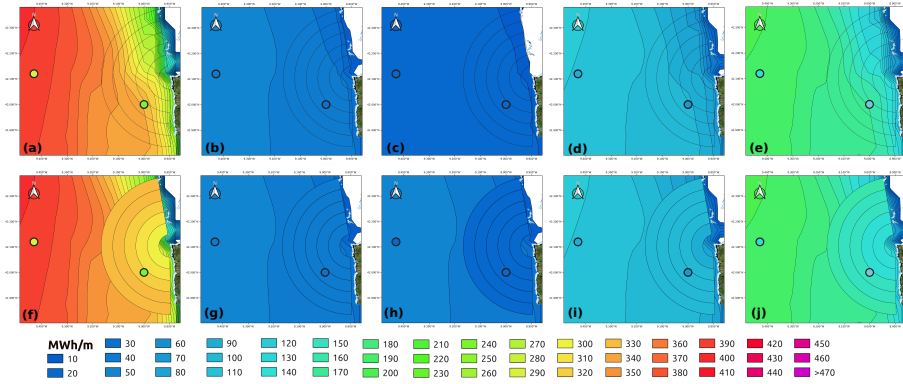


Figura 5.12: Energía media anual (a, f) y por estación de la zona de Silleiro: primavera (b,g), verano (c,h), otoño (d,i) e invierno (e,j). Fondo con los datos de WW3. S68 y SB representados con un círculo. Los arcos negros corresponden a los 5 RCs de SILL, pero solo se muestran sus datos de Em en la línea inferior (f-j).

La variabilidad espacial de la potencia del oleaje (P) y la Em también se analizó por medio del coeficiente de variabilidad (CoV) [68]:

$$CoV = \left(\sum_{i=1}^N sd_i / md_i \right) / N \quad (5.1)$$

donde N es el número total de muestras de la serie de datos; sd y md son, respectivamente, la desviación estándar y la media de cada conjunto de datos de la misma muestra temporal (i) pero diferente ubicación. En el caso de los radares, estas ubicaciones son los RCs y en el del modelo WW3 son las celdas de su malla que coinciden con la bisectriz de los RCs de los radares. Para calcular el CoV de Em N es igual a 1, pues solo hay un dato para cada ubicación. Lo primero que destaca en los resultados mostrados en la Tabla 5.7 es la elevada diferencia entre el CoV de Em y P calculado con los radares, lo que revela que hay gran dispersión en los valores de sus muestras y que queda matizada al calcular la media. También se ha detectado que la mayor variabilidad espacial de Em se da en verano, en contraste con lo que se intuía en los mapas anteriores (Figuras 5.11, 5.12). Esto se debe a que la variación neta apenas implica 1 MWh/m, y la escala de colores de dichas figuras

muestra variaciones ≥ 10 MWh/m. En el caso de VILA (Tabla 5.7 (a)), el CoV entre los RCs supera al que se da entre las celdas de WW3 en torno a un 70 % y en verano llega al 180 %. En la zona de Silleiro (Tabla 5.7 (b)) la variabilidad de Em mostrada por el radar es menor que la de WW3 (≈ -14 %), salvo en primavera y verano ($\approx +16$ % y $+27$ % respectivamente). La significativa diferencia entre ambas zonas, además de la diferencia de datos, puede estar motivada por la mayor pérdida de datos y sensibilidad a la señal de VILA con la distancia, así como la mayor uniformidad a lo largo de los RCs de SILL debido a la rectitud de la costa en esa zona.

Tabla 5.7: Coeficientes de variabilidad (CoV) de la energía media (Em) y la potencia (P) undimotriz.

(a) VILÁN					(b) SILLEIRO				
CoV (%)					CoV (%)				
Em		P			Em		P		
datos	VILA RCs	WW3 celdas bisectriz	VILA RCs	WW3 celdas bisectriz	datos	SILL RCs	WW3 celdas bisectriz	SILL RCs	WW3 celdas bisectriz
Anual/Total	7,12	4,04	22,97	5,30	Anual/Total	4,34	5,02	23,36	6,81
Primavera	9,66	3,78	24,66	5,28	Primavera	5,20	4,46	25,21	6,69
Verano	12,11	4,32	19,30	6,16	Verano	7,67	6,03	26,56	8,08
Otoño	7,40	3,92	22,21	4,80	Otoño	3,94	4,96	18,58	6,45
Invierno	5,88	4,16	21,82	5,03	Invierno	4,20	5,06	20,43	5,93

5.3. Producción eléctrica de un WEC

La producción anual y estacional de energía eléctrica con dos dispositivos de aprovechamiento de la energía de las olas (WEC, Pelamis y Aquabuoy) ha sido calculada mediante sus matrices de potencia (Figuras 5.13 (a,b)) y las equivalentes matrices de ocurrencia generadas con los datos emparejados brutos de los radares, boyas y puntos SIMAR (ver Tabla 5.5 y Métodos). Las matrices de ambos WECs describen rangos de H_{m0} y de periodos (T_e y T_p) más restrictivos que las matrices que describen el recurso undimotriz (Figuras 5.7, 5.8), por lo que la producción de electricidad, en términos relativos, muestra

unos resultados muy diferentes a los de la Em calculada previamente (Tabla 5.6).

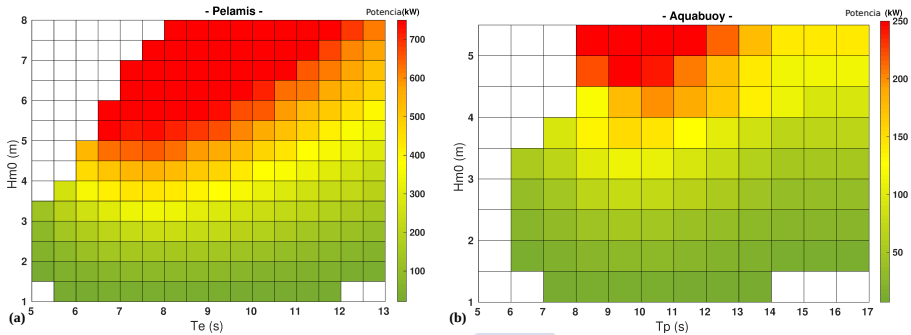


Figura 5.13: Matrices de potencia de los WECs Pelamis (a): potencia por cada combinación de T_e vs H_{m0} (resolución 0,5 s x 0,5 m) y Aquabuoys (b): potencia por cada combinación de T_p vs H_{m0} (resolución 1 s x 0,5 m).

VB muestra los mayores valores de energía y VILA describe de nuevo la menor energía (- 39 %, Tabla 5.8 (a,c)). Los elevados porcentajes de ocurrencia de la matriz de energía de VILA (Figura 5.7 (a)) para T_e 10-12 s y H_{m0} 3-6 m, no corresponden a las celdas de mayor producción de los WECs (celdas rojas, Figura 5.13). Además, todos los valores por encima de 5,5 m quedan fuera de la matriz de Aquabuoys. Esto sumado a la pérdida de muestras en los rangos de oleaje más pequeño, especialmente en verano, ha tenido un significativo impacto en la estimación de la producción de los WECs, siendo en términos relativos mucho menor que la Em estimada para el recurso (Tabla 5.6). Igualmente, la producción calculada con S28 refleja que gran parte de las muestras de su matriz de energía, especialmente los elevados valores de T_e , han quedado fuera de los rangos de mayor producción de los WECs (Tabla 5.8 (a,c)).

Del mismo modo, en esta ocasión la producción de electricidad calculada con SILL ha sido inferior que con SB (-16 %) (Tabla 5.8 (b,d)). Así, las abundantes muestras del radar con periodos entre 10-13 s y H_{m0} entre 3-6 m ha quedado fuera de las celdas de mayor producción de los WECs, al igual que parte de las muestras con el oleaje más elevado, por lo que la falta de muestras por nulos ya no

es compensada por la sobrestimación de H_{m0} y T_e de SILL. El caso de S68 es similar y muestra una significativa disminución en la estimación de la energía (Tabla 5.8 (b,d)).

Tabla 5.8: Producción de electricidad anual y estacional de Pelamis y Aquabuoy en base al recurso descrito por las tres fuentes de datos de las zonas de Vilán (a,c) y Silleiro (b,d). Los datos de los radares corresponden a los RCs 10 km.

VILÁN				SILLEIRO			
(a)	Pelamis Electricidad media generada (MWh)			(b)	Pelamis Electricidad media generada (MWh)		
datos	S28	VILA	VB	datos	S68	SILL	SB
Anual	1.107,59	996,00	1.612,53	Anual	773,39	1.198,51	1.421,46
Primavera	200,00	146,86	250,16	Primavera	149,98	199,30	258,66
Verano	135,43	69,94	158,12	Verano	99,95	128,74	145,63
Otoño	431,36	443,70	654,90	Otoño	223,79	394,71	442,19
Invierno	362,94	362,62	579,31	Invierno	305,86	492,73	591,41

(c)	Aquabuoy Electricidad media generada (MWh)			(d)	Aquabuoy Electricidad media generada (MWh)		
datos	S28	VILA	VB	datos	S68	SILL	SB
Anual	362,88	267,22	442,93	Anual	260,83	350,55	415,74
Primavera	63,90	43,84	70,39	Primavera	48,86	62,29	76,81
Verano	41,24	22,03	45,36	Verano	30,94	42,28	44,79
Otoño	142,84	115,10	183,52	Otoño	79,71	120,13	134,78
Invierno	121,95	93,21	153,82	Invierno	104,05	131,34	164,88

5.4. Completar series de datos de boyas con datos de radares

A continuación, a diferencia de los casos anteriores, se ha calculado Em con datos totales de las tres fuentes de datos de la zona de Vilan (Tabla 5.1), con el fin de analizar la repercusión de los huecos en las series de datos de VB y de utilizar los datos del radar para completarlas. Este procedimiento no se repitió con la boya de Silleiro por no mostrar

tantos huecos en sus datos y por la elevada sobreestimación de la energía undimotriz por parte de SILL.

Para ayudar a comprender los resultados se puede consultar la Tabla 5.1 donde se observa que en comparación con S28 cuyas muestras válidas son casi las mismas que las ideales (35.666), VB tiene bastante menos muestras (33.637), debido sobre todo a la pérdida de datos durante dos primaveras (abril, 2015 y abril, 2019) y dos inviernos (enero-febrero, 2014, febrero-marzo, 2019, ver Figura 3.5).

Como se puede observar en la Tabla 5.9, las diferencias entre la Em de VB y S28 son mayores que al usar datos emparejados (Tabla 5.6), pasando aproximadamente de -5 % al -16 % anual, especialmente por el efecto de la diferencia de los inviernos (de -1 % a -21 %). Cuando se completan los datos de VB con los de VILA, las diferencias relativas en la energía media respecto a S28 pasan a ser similares a las mostradas con datos emparejados.

Tabla 5.9: Energía media undimotriz (Em) anual y estacional calculada con S28, VB y el conjunto de datos resultante de completar las series de datos de VB con muestras de VILA (VB + VILA).

VILÁN			
$Em(MWh/m)$			
Datos	S28	VB	VB+VILA
Anual	417,28	350,75	404,00
Primavera	54,63	44,05	47,05
Verano	31,78	28,18	28,29
Otoño	145,99	139,43	139,52
Invierno	180,87	142,02	183,37

5.5. Discusión

Teniendo en cuenta los resultados de la validación de los datos de oleaje producidos por los radares, en la que se mostró la elevada correlación entre la cantidad y calidad de los datos con las características de este, durante la evaluación del recurso undimotriz se ha evitado hacer comparaciones directas entre los resultados de VILA y SILL, pues los periodos de datos utilizados no son coincidentes en ambas zonas.

En general, la sobreestimación mostrada por los radares en la validación estadística de la potencia del oleaje está ligada a cierta sobreestimación por parte de los radares de la H_{m0} , pero especialmente de T_e , algo que es muy relevante en el caso de SILL (Figura 5.2 (c)). El hecho de que esta sobreestimación sea algo mayor en primavera y verano tiene su origen, por un lado, en la relevante sobreestimación de los valores bajos del T_e de la boya, cerca del límite de medición de los radares (≈ 5 s) [67, 73, 65] y por otro lado, porque según el estado de mar se produce la infraestimación de H_{m0} por falta de datos en el espectro o por el contrario la sobreestimación si se dan ciertas condiciones de bimodalidad [76, 75], frecuentes cuando el oleaje es menos energético [20].

En el caso concreto de VILA, el resultado de la validación estadística muestra una ligera sobreestimación de la potencia y energía total del oleaje respecto a VB (Tabla 5.3), debida a la sobreestimación de H_{m0} y T_e , especialmente entre los 9–12 s (Figura 5.7). Sin embargo, al calcular Em con los datos brutos emparejados, los resultados de VILA fueron inferiores a los de VB y S28, especialmente en verano (Tabla 5.6 (a)), debido al elevado número de datos nulos, que en el caso de VILA no se limita solo a los valores más bajos de H_{m0} (Figura 4.12 (a)). Esto también tiene un especial impacto en la dirección predominante del oleaje durante el verano, que VILA describe como del ONO mientras que VB la describe en un amplio abanico entre el O y e NE (Figura 5.9). Por el contrario, cuando se comparan los datos limpios emparejados, como en el trabajo de Lorente et al, 2019, sin la incidencia de los datos nulos, ambos dispositivos describen el oleaje dominante en

verano como del ONO. Aun así, hay ciertas limitaciones en el radar a la hora medir el oleaje del NE, como su límite de dirección en los 41° , la incidencia de estados de mar bimodales, e incluso debido a que parte de los RCs están en sobra de este oleaje por la forma de la costa [111]. Esto último también es un factor limitante en los cálculos de S28 pues no describe oleaje con direcciones más este de los 30° .

La elevada variabilidad espacial entre los RCs de VILA, en comparación con lo mostrado por el modelo WW3 (Tabla 5.7 (a)), podría tener explicación por un lado en la diferente pérdida de datos por nulos entre las RCs y por otro, por la diferente exposición de los RCs, por la forma tan accidentada de la costa, al variado oleaje de la zona de Vilán que abarca desde el SO al NE [6, 49] lo que aumenta la variabilidad entre estos [45].

La energía undimotriz total y media descrita con el modelo S28 también es ligeramente superior a la de VB (Figura 5.3 y Tabla 5.6 (a)). Esto es debido principalmente a la desviación de casi toda su serie de datos hacia valores más altos de T_e (Figura 5.2 (b)), sin embargo, algo compensada por una ligera infraestimación de H_{m0} (Figura 5.7).

Respecto a la utilización de datos del radar de Vilán para cubrir los huecos en el fondeo de la boya (Tabla 5.9), la principal ventaja es que, en los periodos más complicados para el mantenimiento de la boya, por el fuerte oleaje, más posibilidad hay de obtener datos fiables del radar. Sin embargo, las diferencias detectadas en la descripción del recurso podrían influir en el cálculo de la energía producida por los WECs.

En la validación estadística SILL muestra una elevada sobreestimación de la potencia y energía total del oleaje respecto a SB y también S68 (Tabla 5.4), la cual, no siendo compensada por los nulos, se da también al calcular Em (Tabla 5.6 (b)). Esto se debe, como ya se ha comentado, a la sobreestimación de H_{m0} y especialmente de T_e (Figura 5.2 (c)), pero más en concreto a que esta sobreestimación recae en combinaciones muy energéticas de ambos parámetros ($11-13$ s y $H_{m0} > 8$ m, Figura 5.8).

La variabilidad espacial mostrada por los datos de SILL tiene un gran acuerdo con la descrita por el modelo WW3. Se muestra algo inferior durante los periodos más energéticos (otoño e invierno) y algo

superior en verano y primavera. De nuevo, la mayor pérdida de datos durante los periodos menos energéticos podría estar induciendo esta mayor variabilidad entre RCs. Por otro lado, aunque los datos no sean los mismos, el hecho de que el acuerdo con el modelo sea mayor que en el caso de VILA, tendría su origen en el menor porcentaje de nulos y en la ya comentada uniformidad del oleaje en la zona de Silleiro y por tanto, también a lo largo de los RCs. Los datos de S68 describen también una gran dispersión de los valores de T_e , sobrestimando de forma muy significativa los de SB (Figura 5.2 (d)), pero también infraestiman H_{m0} , no llegando a alcanzar los valores máximos de la boya y el radar (Figura 5.8). El resultado es la infraestimación de E_m , en mayor grado en otoño e invierno, cuando normalmente se alcanzan los valores más altos de H_{m0} (Tabla 5.6 (b)). Esto estaría relacionado con la tendencia del modelo SIMAR a infraestimar los valores más extremos de H_{m0} [107].

Aun teniendo en cuenta que los periodos de tiempo analizados no son los mismos, la discusión del resultado del cálculo de la producción de los WECs con todas las fuentes de datos es similar (Tabla 5.8). Así, en ambas zonas, la menor energía estimada con los radares y puntos SIMAR ha sido muy relevante. Para analizar esto debe tenerse en cuenta que, a diferencia del cálculo de la energía undimotriz disponible, en el cálculo de la energía producida por un WEC entran en juego las limitaciones de este [15], como son los valores mínimos y máximos de H_{m0} y T con los que puede operar. Esto hace que parte del oleaje descrito en una zona quede fuera de los cálculos [16, 17, 18].

Así, en el caso de los radares, además de cierta pérdida de energía debido a los datos nulos, las combinaciones de H_{m0} y T que producen la sobreestimación de la potencia del oleaje, especialmente en el caso de SILL, no corresponden a los picos de producción de los WECs, e incluso parte queda fuera de sus matrices de potencia, tanto por sobrepasar T_e , en el caso de Pelamis, como H_{m0} en el caso de Aquabuoy (ver Figuras 5.13, 5.7, 5.8). En el caso de los puntos SIMAR, esto es aún más notable pues las combinaciones más energéticas de sus datos tienen valores muy elevados de T .

CONCLUSIONES

Los radares, aunque no *in situ*, sí son considerados como dispositivos de medición directa del oleaje, con amplias posibilidades de resolución y cobertura espacial y temporal, dependiendo de sus frecuencias de trabajo. En esta Tesis se han evaluado los datos de oleaje generados por los radares HF del modelo Sesonde de CODAR, instalados en Cabo Vilán (VILA) y Cabo Silleiro (SILL) en la costa oeste de Galicia (noroeste de España). La validación de los radares frente a los datos de las boyas de Vilano-Sisargas (VB) y Silleiro (SB) y puntos SIMAR, se centró en los parámetros espectrales H_{m0} (altura significativa), T_c (periodo centroide) del radar frente al T_p (periodo pico) de las otras fuentes de datos y D_m (dirección media del oleaje). El enfoque de este análisis se ha basado principalmente en las características particulares de la geografía, climatología y oleaje de las zonas de estudio, así como en las debilidades y fortalezas de la tecnología de los radares. También se ha analizado la aplicación de los datos de los radares para la evaluación del recurso undimotriz y su posterior utilización para calcular la producción de electricidad de dos dispositivos de aprovechamiento del oleaje (WECs).

- A través de los datos de VILA, se ha comprobado que la utilización de versiones actualizadas del software de los radares puede dar lugar a una mejoría sensible en la calidad de los datos.
- La aplicación de las modificaciones en el método de filtrado, permite detectar un mayor número de datos espurios que quedaban sin marcar por estar embebidos entre largas series de datos nulos.

CONCLUSIONES

- La cuantificación y clasificación de los datos de oleaje de los radares ha revelado un elevado porcentaje de muestras no válidas (nulos), que supone la pérdida de casi el 40% de los datos de SILL y más del 50% de los de VILA. Como consecuencia, en la información ofrecida por los radares falta gran parte del oleaje inferior a 3 m, y en el caso de VILA incluso entre 3 y 5 m. Además, esta pérdida aumenta con la distancia al radar condicionando en gran medida la utilidad y fiabilidad de los datos de los arcos (RC) más alejados de los radares. La falta de señal, debida a los datos nulos, no parece corresponder a los límites estandarizados de este modelo de radar, por lo que podría haber algún tipo de interferencia o carencia técnica que podría ser solventada en el futuro.
- Hay una cierta heterogeneidad en la correspondencia de los datos de los radares con los de las boyas y puntos SIMAR. En concreto, la concordancia entre los datos de VILA con los de VB y los puntos SIMAR próximos es mayor que entre los de SILL y SB.
- El parámetro más fiable obtenido con las mediciones de radares es H_{m0} , con índices de correlación lineal (R) de 0,88 para VILA y 0,83 para SILL. El T_c de los radares tiende a sobrestimar el T_p de las boyas y en el caso de D_m se dan las mayores diferencias como son la tendencia más oeste y sur de VILA, la elevada dispersión mostrada por SILL, la saturación de muestras en los límites de costa e incluso agregaciones de posibles espurios en torno a direcciones concretas detectadas en ambos radares.
- Desde el punto de vista del alcance espacial, los datos de oleaje del radar VILA son válidos en cantidad y calidad hasta un alcance de 30 km. En el caso de SILL, aun perdiendo cierta cantidad de datos podrían ser válidos hasta los 45 km.
- Las diferencias más relevantes y comunes entre los radares y sus respectivas boyas se deben, por un lado, a que el periodo de los radares es el centroide del espectro de oleaje ajustado a un modelo unimodal y está limitado a valores entre 5 y 17 s. Y por otro a la singularidad de diversos tipos de estado de mar bimodales que

no son bien descritos por los parámetros espectrales de boyas y radares, induciendo tanto sobrestimación como infraestimación de T_p y H_{m0} . Igualmente, la D_m de las boyas (y radares) no siempre es una fiel representación del oleaje pues toma un valor medio entre las direcciones simultáneas que se suelen dar en la zona, como son el oleaje local del NE o SO y el mar de fondo del NO.

- Del análisis pormenorizado de los datos de los radares por régimen de oleaje, se han obtenido resultados cualitativos y cuantitativos que sirven de guía para poder discernir la fiabilidad de los parámetros de oleaje, según sea la necesidad de su aplicación final.
- Los radares podrían reducir el tiempo de datos promediados para el ajuste del modelo de 180 a 120 minutos, aunque con una pérdida media del 3 % en la calidad y 8 % en la abundancia de datos.
- Cerrar los límites de costa durante el procesado de los espectros de VILA, para evitar zonas de poca profundidad, no proporcionó evidencias claras de una mejora en la calidad de los datos, aunque sí reduce la tendencia hacia direcciones más oeste.
- Hay una mayor correlación entre el valor de T_e de las boyas y el T_e estimado para los radares, pero se mantiene cierta sobreestimación, muy significativa en el caso de SILL, que condiciona la evaluación del recurso undimotriz y el cálculo de la energía eléctrica producida con los WECs.
- La mayor disponibilidad y calidad de los datos de los radares durante los periodos de oleaje más energéticos, los hace útiles para completar las series de datos de las boyas cuando su mantenimiento o fondeo resulta más complicado.

Trabajo futuro

Una de las conclusiones de esta Tesis ha sido la relevancia en las diferencias entre periodos de radares y boyas, algo que también es notable entre los puntos SIMAR y las boyas, y su importante relación

CONCLUSIONES

con oleajes complejos o bimodales. Por esto, se considera necesario un análisis particionado de los espectros de oleaje que permita, por un lado, la correcta validación entre los periodos estimados por radares y boyas, y por otro, lograr una descripción más precisa del oleaje [19], lo que a su vez permitiría aumentar la precisión a la hora de calcular la producción de energía de un WEC [20, 15, 12]. En el caso del modelo de radar Seasonde, se espera que con el desarrollo del nuevo software [75] se generen parámetros de oleaje diferentes para oleajes de fondo y de viento, lo que permitiría este tipo de análisis. También está en debate, la posibilidad de desarrollar nuevas versiones de radar que permitan la medición tanto de oleaje muy pequeño como muy elevado, mediante un sistema que cambie la frecuencia de trabajo según se precise [65]. Otra continuación a este trabajo sería el análisis de los datos aparentemente espurios, que tanto para VILA como SILL, parecen concentrarse en unas direcciones concretas.

Durante esta Tesis se ha participado en varios proyectos, entre cuyos objetivos están la difusión de los datos de oleaje. Así, se han planteado diversas formas de comunicar los parámetros de oleaje junto a ciertas aclaraciones respecto a su calidad, y con especial cuidado respecto a la interpretación de la dirección. Debería continuarse con esta línea de difusión, para aumentar la disponibilidad de datos de medición directa del oleaje.

ANEXO. Fuentes de datos

A.1. Radares HF

Los radares HF analizados en esta tesis son de onda continua interrumpida con frecuencia modulada (FMICW, siglas del término en inglés Frequency Modulated interrupted Continuous Wave). Emiten una onda electromagnética de superficie de polarización vertical, por lo que tienen la capacidad de desplazarse largas distancias, pudiendo incluso seguir la curvatura de la tierra, transmitiéndose mediante la reflexión en la ionosfera y la conductividad de la superficie del agua [64, 100]. Los rangos de frecuencia que permite esta reflexión en la ionosfera están entre 5 y 50 MHz. Para que la señal retorne al radar, debe retrodispersarse en una 'ola Bragg', definida como una ola con longitud la mitad de la longitud de la onda del radar y con dirección desde o hacia el radar. Además, para que esto suceda, la onda del radar debe incidir en el océano de forma completa un mínimo de veces, lo que requiere una distancia mínima que definirá la resolución del radar (5 km en el caso de VILA y SILL). Esta distancia mínima está condicionada por la frecuencia de trabajo de los radares y más concretamente por el ancho de banda de su modulación o salto, la cual será menor cuanto menor sea la frecuencia del radar para evitar interferencias. En compensación, cuanto menor frecuencia mayor es el alcance del radar (Tabla A.1). La medición de parámetros oceanográficos, corrientes, oleaje y viento, con estos radares se basa en el efecto Doppler de la señal retrodispersada tras contactar con la superficie del océano (ver Sección 3.2.1.). Las

frecuencias de los radares determinan la longitud de onda (λ) de las olas Bragg que pueden producir la retrodispersión y por tanto el valor mínimo del periodo de las olas que deben incidir con estas para producir picos de segundo orden en el espectro de la señal [67], que son los que aportan información sobre el oleaje completo. Aunque dependerá del ruido de la señal, también por la frecuencia se define un mínimo de altura de ola medible por el radar (H_{min}) y un máximo (H_{sat}), sin que se produzca la saturación de la señal, definido por la relación $H_{sat} = \lambda/\pi$ [65]. Así, por ejemplo, en el caso de los radares Seasonde de CODAR se describen las siguientes características (Tabla A.1):

Tabla A.1: Características y limitaciones de los radares HF en función de su frecuencia de trabajo [112, 44]. Valores aproximados.

Frecuencia	Ola Bragg λ (m)	Ola Bragg T (s)	H_{min} (m)	H_{sat} (m)	Alcance (km)	Resolución (km)
42 Mhz	3,6	1,13	0,25	3	20	0,5
25 MH	6	1,9	0,5	4	40	2
12 MHz	12,5	2,8	0,75	7	70	3
5 MHz	30	4	1	20	200	5

Los radares utilizados en esta Tesis forman parte de una red de radares desplegados en la costa gallega, que consiste en 4 radares con frecuencia de trabajo es 4,86 MHz que ofrecen en la actualidad datos de corrientes mediante la combinación de los datos de radiales de dos radares. También recopilan datos de oleaje, aunque por el momento no están siendo aplicados. El radar de Cabo Vilán (VILA) y el instalado en Cabo Prior fueron adquiridos en 2010 por la Conselleria do Mar (Xunta de Galicia) y están gestionados por el Instituto Intecmar [113] y los radares de Cabo Silleiro (SILL) y Cabo Finisterre fueron adquiridos por la Dirección General de la Marina Mercante y gestionados por Puertos del Estado (PdE) desde 2005 en colaboración con las autoridades portuarias de Coruña y Vigo [80].

A.2. Boyas

Como fuente de datos de referencia para las validaciones de los datos de oleaje se han utilizado dos boyas gestionadas por PdE: la boya Vilano-Sisargas (VB), ubicada a unos 40 km al noroeste del Cabo Vilán y boya Silheiro (SB) a unos 60 km al oeste del Cabo Silheiro (Figura 3.1, Tabla A.2). Ambas boyas son modelos SeaWatch equipados con sensores para la toma de datos oceanográficos y meteorológicos. Para el oleaje disponen de un sensor DATAWELL Mark II DWR/WAVESENSE que registra sus movimientos y los procesa calculando los desplazamientos netos en todas las dimensiones, a partir de los cuales genera el espectro completo del oleaje. La medición se realiza durante 30 minutos y, como resultado, cada hora se genera una muestra con los parámetros espectrales del oleaje. Estas boyas, también van equipadas con sensores YOUNG/AANDERA que miden la dirección y velocidad del viento durante 10 minutos cada hora, a una altura aproximada de 3 m sobre la superficie [114, 115, 116]. Los datos se promedian generando muestras también horarias, que junto a las del oleaje son transmitidas en tiempo real vía satélite a PdE y sometidas al control de calidad del CMEMS [103], el cual asigna a cada dato un código en función de su fiabilidad [117, 49]. De los archivos resultantes facilitados por PdE se utilizaron los siguientes parámetros espectrales del oleaje: la altura significativa (H_{m0}), el periodo pico (T_p) y medio (T_m), la dirección media (D_m) y pico (D_p) y la dispersión angular en el pico de la energía (D_{ap}). Y del viento la velocidad y dirección.

Cada cierto periodo de tiempo los datos brutos son recopilados por PdE directamente de las boyas. A partir de estos se pudieron recopilar los momentos espectrales 0 y -1 (m_0 , m_{-1}) y el periodo energético (T_e). También se obtuvieron los componentes de los espectros de frecuencia y dirección, esto es, para cada muestra se facilita el m_0 y unos rangos de frecuencia, a cada uno de los cuales se les asigna una fracción de la energía del espectro (FE), la dirección media y la dispersión angular. La energía correspondiente a cada frecuencia ($S(f)$) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S(f) = ((\sqrt{m_0}/100)^2/FE)/f \quad (\text{A.1})$$

donde, f = ancho de la banda de frecuencia.

A.3. Puntos SIMAR

Los puntos SIMAR (SIMulación MARina), forman parte del subconjunto WANA (siglas del término en inglés Waves Analysis), fueron desarrollados por Puertos del Estado y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). WANA produce datos de oleaje utilizando los modelos WAM (siglas del término en inglés Wave Modelling) y WaveWatch, que a su vez utilizan como forzamiento meteorológico el modelo HIRLAM (siglas del término en inglés High Resolution Local Area Modelling). Es importante resaltar que los datos de SIMAR no son de pronóstico sino el resultado del reanálisis de los datos proporcionados por los modelos y también que todas las localizaciones son consideradas como aguas abiertas y profundas [107]. Este modelo proporciona los parámetros espectrales de H_{m0} , T_p y D_m , y también los correspondientes al oleaje de viento y a dos oleajes de fondo. En esta Tesis se utilizaron los parámetros espectrales de los siguientes puntos SIMAR 3002024 (S24), 3004020 (S20), 3014002 (S02), 3004028 (S28) y 1044068 (S68) (Figura 3.1, Tabla A.2).

A.4. Modelo WaveWatch III

El modelo WaveWatch III (WW3), cuyos datos fueron facilitados por Meteogalicia, ha sido utilizado en esta Tesis por su amplia cobertura espacial, que abarca tanto las posiciones de las boyas como toda la zona de barrido de los radares, y su similar resolución a la de los radares ya que utiliza una malla de $0,5^\circ$ (≈ 5 km). Este modelo utiliza el modelo GFS (siglas del término en inglés Global Forecast System) como forzamiento meteorológico y la salida de datos contiene muestras de oleaje horarias, de las que las 12 primeras horas corresponden a

datos de reanálisis y las siguientes 96 horas a pronóstico [27]. Este modelo facilita parámetros espectrales del oleaje y también de forma diferenciada de mar de viento y de fondo. Durante la tesis se han utilizado los parámetros espectrales de oleaje H_{m0} y T_p correspondientes a los datos de reanálisis.

A.5. Estación meteorológica de Camariñas

A través del servicio meteorológico de Meteogalicia [118] se obtuvieron datos de viento de la estación meteorológica de Camariñas cuya ubicación está cerca de Cabo Vilán, donde está emplazado el radar VILA (Figura 3.1, Tabla A.2). Las mediciones de la dirección y velocidad del viento se llevan a cabo mediante un anemómetro-veleta YOUNG, a unos 10 m de altura y se generan datos promediados cada 10 minutos. A las muestras se les aplica un filtro de calidad que asigna un código según su fiabilidad o si el dato es nulo o vacío.

Tabla A.2: Coordenadas de las ubicaciones de Boya Vilano-Sisargas (VB), radar de Vilán (VILA), puntos SIMAR 3004028 (S28), 3002024 (S24), 3004020 (S20), 1044068 (S68), 3014002 (S02), boya Silleiro (SB), radar de Silleiro (SILL) y la estación meteorológica de Camariñas (CW).

Dispositivo	Latitud	Longitud
VB	43,50	-9,22
VILA	43,16	-9,21
S28	43,17	-9,33
S24	43	-9,42
S20	42,83	-9,33
SB	42,12	-9,43
S68	42,00	-9,00
SILL	42,10	-8,90
S02	42,08	-8,92
CW	43,12	-9,18



Bibliografía

- [1] Rusu, E.; Venugopal, V. Special Issue. Offshore Renewable Energy: Ocean Waves, Tides and Offshore Wind. *Energies* **2019**, *12*, 182;
- [2] Leischman, J.M., and Scobie, G. The development of wave power - A techno-economic survey. *Report EAU M25*, UK National Engineering Laboratory; East kilbride Glasgow, Scotland, UK. 1976.
- [3] Pecher, A.; Kofoed, J.P. Handbook of Ocean Wave Energy; Springer International Publishing, AG Switzerland **2017**.
- [4] Esteban, M.; Leary, D. Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy. *Applied Energy* **2012**, *90(1)*, 128-136.
- [5] Gunn, K.; Stock-Williams, C. Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy* **2012**, *44*, 296-304, ISSN 0960-1481.
- [6] Iglesias, G.; Carballo, R. Wave energy potential along the Death Coast (Spain). *Energy* **2009**, *34 (11)*, 1963-1975.
- [7] Iglesias, G.; Carballo, R. Choosing the site for the first wave farm in a region: A case study in the Galician Southwest (Spain), *Energy* **2011**, *36(9)*, 5525-5531.

- [8] Mueller, M.; Wallace, R. Enabling science and technology for marine renewable energy. *Energy Policy* **2008**, *36* (12), 4376-4382. ISSN 0301-4215.
- [9] Aderinto, T.; Li, H. Review on Power Performance and Efficiency of Wave Energy Converters. *Energies* **2019**, *12*, 4329.
- [10] OES Annual Report. An Overview of Ocean Energy Activities in 2019. Published by The executive Committee of Ocean Energy Systems. Edited by Ana Brito e Melo and Henry Jeffrey
- [11] Thorpe, T.W.; Picken, M.J. Wave energy devices and the marine environment. *IEE Proceedings* **1993**, *140*, (1), 63-70.
- [12] Ahn, S.; Haas, K.A.; Neary, V.S. Dominant Wave Energy Systems and Conditional Wave Resource Characterization for Coastal Waters of the United States. *Energies* **2020**, *13*, 3041.
- [13] Carballo, R.; Arean, N.; Alvarez, M.; López, I.; Castro, A.; López, M.; Iglesias, G. Wave farm planning through high-resolution resource and performance characterization. *Renewable Energy* **2019**, *135* 1097-1107.
- [14] Ribeiro, A.S.; de Castro, M.; Rusu, L.; Bernardino, M.; Dias, J.M.; Gomez-Gesteira, M. Evaluating the Future Efficiency of Wave Energy Converters along the NW Coast of the Iberian Peninsula. *Energies* **2020**, *13*, 3563.
- [15] Mérigaud, A.; Ringwood, J.V. Power production assessment for wave energy converters: Overcoming the perils of the power matrix. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: *Journal of Engineering for the Maritime Environment* **2018**, *232*(1) 50-70.
- [16] Folley, M. Whittaker, T.J.T. Analysis of the nearshore wave energy resource. *Renewable Energy* **2009**, *34* (7), 1709-1715, ISSN 0960-1481.

- [17] Silva, D.; Rusu, E.; Soares, C.G. Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore. *Energies* **2013**, *6*, 1344-1364.
- [18] Guillou, N.; Chapalain, G. Annual and seasonal variabilities in the performances of wave energy converters. *Energy* **2018**, *165*, Part B, 812-823, ISSN 0360-5442.
- [19] Saulnier, JB.; Prevosto, M.; Maisondieu, C. Refinements of sea state statistics for marine renewables: A case study from simultaneous buoy measurements in Portugal. *Renewable Energy* **2011**, *36* (11), 2853-2865, ISSN 0960-1481.
- [20] Robertson, B.; Clancy, D.; Bailey, H.; Buckham, B. Improved Energy Production Estimates from Wave Energy Converters through Spectral Partitioning of Wave Conditions. Proceedings of the Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference. Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21-26, 2015
- [21] Carballo, R.; Iglesias, G. A methodology to determine the power performance of wave energy converters at a particular coastal location. *Energy Conversion and Management* **2012**, *61*, 8-18, ISSN 0196-8904.
- [22] Atan, R.; Goggins, J.; Harnett, M.; Agostinho, P.; Nash, S. Assessment of wave characteristics and resource variability at a 1/4-scale wave energy test site in Galway Bay using waverider and high frequency radar (CODAR) data. *Ocean Engineering* **2016**, *117*, 272-291, ISSN 0029-8018.
- [23] Silva, D.; Martinho, P.; Guedes Soares, C. Wave energy distribution along the Portuguese continental coast based on a thirty three years hindcast, *Renewable Energy* **2018**, *127*, 1064-1075, ISSN 0960-1481
- [24] Lavidas, G.; Venugopal, V. Application of numerical wave models at European coastlines: A review. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews* **2018**, 92, 489-500, ISSN 1364-0321.
- [25] Guillou, N.; Lavidas, G.; Chapalain, G. Wave Energy Resource Assessment for Exploitation—A Review. *J. Mar. Sci. Eng.* **2020**, 8, 705.5
- [26] Tolman, H. L. The numerical model WaveWatch: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. In *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Delft University of Technology. Delf. Netherlands. 1989. Volume 89-2. ISSN 0169-6548.
- [27] Carracedo, P.; Balseiro, C.F.; Penabad, E.; Gómez, B. & Pérez-Muñuzuri, V. One year validation of wave forecasting at Galician coast. *Journal of Atmospheric & Ocean Science* **2005**, 10:4, 407-419.
- [28] Mackay, E.B.L.; Bahaj, A.S.; Challenor, P.G. Uncertainty in wave energy resource assessment. Part 1: Historic data. *Renewable Energy* **2010**, 35 (8), 1792-1808, ISSN 0960-1481.
- [29] Bernardino, M.; Guedes Soares, C. Evaluating marine climate change in the Portuguese coast during the 20th century. In *Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources*; Guedes Soares, C., Teixeira, A.P., Eds.; Taylor & Francis: London, UK, **2018**, 1089–1095.
- [30] Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research – Oceans* **1999**, 104(C4), 7649–66.
- [31] Atan, R.; Goggins, J.; Nash, S. A Detailed Assessment of the Wave Energy Resource at the Atlantic Marine Energy Test Site. *Energies* **2016**, 9, 967.

- [32] MeteoGalicia. Atlas de ondas de Galicia. Santiago de Compostela, A Coruña, Spain. 2014.
- [33] Guedes Soares,C.; Rute Bento, A.; Gonçalves, M; Silva, D.; Martinho, P. Numerical evaluation of the wave energy resource along the Atlantic European coast. *Computers & Geosciences* **2014**, *71*, 37-49, ISSN 0098-3004.
- [34] Carballo, R.; Sánchez, M.; Ramos, V.; Taveira-Pinto, F.; Iglesias, G. A high resolution geospatial database for wave energy exploitation. *Energy* **2014**, *68*, 572-583, ISSN 0360-5442.
- [35] Rusu, E. Numerical Modeling of the Wave Energy Propagation in the Iberian Nearshore. *Energies* **2018**, *11*, 980.
- [36] Pitt, E. Assessment of Wave Energy Resource. Report of European Marine Energy Centre LTD (EMEC). **2009** First published in the UK in 2009 by BSI, 389 Chiswick High Road, London W4 4AL.
- [37] Bué, I.; Semedo, Á.; Catalão, J. Evaluation of HF Radar Wave Measurements in Iberian Peninsula by Comparison with Satellite Altimetry and in Situ Wave Buoy Observations. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 3623.
- [38] Rusu, L.; Rusu, E. Evaluation of the Worldwide Wave Energy Distribution Based on ERA5 Data and Altimeter Measurements. *Energies*. **2021**, *14*, 394.
- [39] Mackay, E; Bahaj, A.; Retzler, C. & Challenor, P. Wave Energy Resource Assessment Using Satellite Altimeter Data. Proceedings of the ASME 2008 *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Estoril, Portugal. June 15–20, 2008. 861-870. ASME.
- [40] Ribal, A.; Zieger, S. Wave energy resource assessment based on satellite observations around, *Indonesia*. *AIP Conf Proc* **2016** *1737*, (060001).

- [41] Paduan, J.D.; Kim, K.C.; Cook, M.S.; Chavez, F.P. Calibration and validation of direction-finding high-frequency radar ocean surface current Observations. *IEEE J. Ocean. Eng.* **2006**, *31*, 862–875.
- [42] Wyatt, L.R.; Green, J.; Middleditch, A.; Moorhead, M.D.; Howarth, J.; Holt, M.; Keogh, S. Operational wave, current, and wind measurements with the Pisces HF radar. *IEEE J. Ocean. Eng.* **2006**, *31*, 819–834.
- [43] Cochín, V.; Mariette, V.; Garello, R. Sea surface current–wave–wind interactions measured by coastal ground wave HF radars. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2008**, *5*, 227–230.
- [44] Signals. Disponible online https://rucool.marine.rutgers.edu/downloads/presentations/presentations-2010/HF_Radar_DC_Course03_Signals.ppt.
- [45] Lipa, B.; Barrick, D.; Alonso-Martirena, A.; Fernandes, M.; Ferrer, M.I.; Nyden, B. The Brahan Project high frequency radar ocean measurements: Currents, winds, waves and their interactions. *Remote Sens.* **2014**, *6*, 12094–12117.
- [46] López, G.; Conley, D.; Greaves, D. Calibration, validation and analysis of an empirical algorithm for the retrieval of wave spectra from HF radar sea echo. *J. Atmos. Ocean. Technol.* **2016**, *33*, 245–261.
- [47] Roarty, H.; Cook, T.; Hazard, L.; Doug, G.; Harlan, J.; Cosoli, S.; Wyatt, L.; Alvarez-Fanjul, E.; Terrill, E.; Otero, M.; Largier, J.; Glenn, S.; Ebuchi, N.; Whitehouse, B.; Bartlett, K.; Mader, J.; Rubio, A.; Corgnati, L.; Mantovani, C.; Griffa, A.; Reyes, E.; Lorente, P.; Flores-Vidal, X.; Saavedra-Matta, K.J.; Rogowski, P.; Prukpitikul, S.; Lee, S.H.; Lai, J.W.; Guerin, C.A.; Sanchez, J.; Hansen, B.; Grilli, S. The Global High Frequency Radar Network. *Frontiers in Marine Science* **2019**, *6*, 164

- [48] Hardman, R.; Wyatt, L. Inversion of HF Radar Doppler spectra using a neural network. *Journal of Marine Science and Engineering* **2019**, 7(8), 255.
- [49] Lorente, P.; Basañez Mercader, A.; Piedracoba, S.; Pérez-Muñuzuri, V.; Montero, P.; Sotillo, M.G.; Álvarez-Fanjul, E. Long-term skill assessment of SeaSonde radar-derived wave parameters in the Galician coast (NW Spain). *Int. J. Remote Sens.* **2019**, 10, 9208–9236.
- [50] Tian, Z.; Tian, Y. and Wen, B. Quality Control of Compact High-Frequency Radar-Retrieved Wave Data in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2021**, 59 (2). 929-939
- [51] Anderson, S. Bistatic and Stereoscopic Configurations for HF Radar. *Remote Sens* **2020**, 12, 689.
- [52] Crombie, D. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 MHz. *Nature* **1955**, 175, 681–68
- [53] Hasselmann, K. Determination of ocean wave spectra from Doppler radio return from the sea surface. *Nat. Phys. Sci.* **1971**, 229, 16-17.
- [54] Barrick, D.E. Extraction of wave parameters from measured HF radar sea-echo Doppler spectra. *Radio Sci.* **1977**, 12, 415–424.
- [55] Lipa, B.; Barrick, D. Wave Propagation Laboratory. Analysis methods for Narrow-Beam High-Frequency Radar Sea Echo. In *NOAA Technical Report ERL 420-WP 56*; U.S. Department of Commerce; National Oceanic and Atmospheric Administration; Environmental Research Laboratories: Boulder, CO, USA, 1982.
- [56] Barrick, D. E. First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea. *IEEE Trans. Antennas Propagat* **1972a** AP-20, 2-10.

- [57] Barrick, D. E. Remote sensing of sea state by radar, in Remote Sensing of the Troposphere. **1972b**, edited by V. E. Derr, chap. 12, US Government Printing Office, Washington, DC.
- [58] Lipa, B. Derivation of directional ocean-wave spectra by integral inversion of second-order radar echoes. *Radio Sci.* **1977**, *12*.
- [59] Lipa, B. Inversion of second—order radar echoes from the sea. *J. Geophys. Res.* **1978**, *83-C2*, 959–962.
- [60] Lipa, B.; Barrick, D. Extraction of sea state from HF radar sea echo: Mathematical theory and modeling. *Radio Sci.* **1986**, *21*, 81-100.
- [61] Heron, M.L.; Dexter, P.E.; Mc. Gann, B.T. Parameters of the air-sea interface by high-frequency ground wave Doppler radar. *Mar. Freshwater Res.* **1985**, *36*, 655–670.
- [62] Wyatt, L.R. Progress in the interpretation of HF sea echo: HF radar as a remote sensing tool. *IEE Proc.* **1990**, *137*, 139-147.
- [63] Chapman, R.D.; Graber, H.C. Validation of HF radar measurements. *Oceanography* **1997**, *10*, 76–79.
- [64] Gurgel, K.-W.; Essen, H.-H.; Kingsley, S.P. High-frequency radars: physical limitations and recent developments. *Coastal Enginerring* **1999** *37* 201-218.
- [65] Lipa, B.; Nyden, B. Directional wave information from the SeaSonde. *IEEE J. Ocean. Eng.* **2005**, *30*, 221–231.
- [66] Forney, R.; Roarty, H.; Glenn, S. Measuring Waves with a Compact HF Radar. In Proceedings of the OCEANS 2015, MTS/IEEE, Washington, DC, USA, 19–22 October 2016.
- [67] Kohut, J.; Roarty, H.; Lichtenwalner, S.; Glenn, S.; Barrick, D.; Lipa, B.; Allen, A. Surface Currents and Wave Validation of a Nested Regional HF radar Network in the Mid-Atlantic Bight. In

- proceedings of the IEEE/OES/CMTC 9th Working Conference on Current Measurement Technology, Charleston, SC, USA, 17–19 March, 2008.
- [68] Long, R.; Barrick, D.; Largier, J.; Garfield, N. Wave observations from central California: SeaSonde Systems and *in situ* wave buoys. *J. Sens.* **2011**, 1-18.
- [69] Falco, P.; Buonocore, B.; Cianelli, D.; De Luca, L.; Giordano, A.; Iermano, I.; Kalampokis, A.; Saviano, S.; Uttieri, M.; Zambardino, G.; Zambianchi, E. Dynamics and sea state in the Gulf of Naples: potential use of high-frequency radar data in an operational oceanographic context. *Journal of Operational Oceanography* **2016**, 9, *sup1*, 33–45.
- [70] Fernandes, M.; Fernandes, C.; Barroqueiro, T.; Agostinho, P.; Martins, N.; Alonso-Martirena, A. Extreme wave height events in Algarve (Portugal): Comparison between HF radar systems and wave buoys. In Proceedings of the 5th Jornadas Engenharia Hidrográfica, Lisboa, Portugal, 19–21 June, 2018, 222–225.
- [71] Wyatt, L.R. Limits to the inversion of HF Radar backscatter for ocean wave measurement. *J. Atmos. Ocean. Technol.* **1999**, 17, 1651-1665.
- [72] Gurgel, K.W.; Essen, H.H.; Schlick, T. An empirical method to derive ocean waves from second-order bragg scattering: Prospects and limitations. *IEEE J. Ocean. Eng.* **2006**, 31, 804–811.
- [73] Hisaki, Y. Quality control of surface wave data estimated from low signal-to-noise ratio HF radar Doppler-Spectra. *J. Atmos. Ocean. Technol.* **2009**, 26, 2444–2461.
- [74] Saviano, P.; Kalampokis, A.; Zambianchi, E.; Uttieri, M. A year-long assessment of wave measurements retrieved from an HF radar network in the Gulf of Naples (Tyrrhenian Sea, Western Mediterranean Sea). *J. Operat. Oceanogr.* **2019**, 12, 1–15.

- [75] Lipa, B.; Daugharty, M.; Fernandes, M.; Barrick, D.; Alonso-Martirena, A.; Roarty, H.; Dicospoulos, J.; Whelan, C. Developments in Compact HF radar Ocean Wave Measurements. In *Physical Sensors, Sensor Networks and Remote Sensing. Book Series: Advances in Sensors: Reviews*, Vol. 5; Yurish, S., Ed.; International Frequency Sensor Association Publishing (IFSA), Castelldefels, Barcelona, Spain: 2018; Chapter 20, pp. 469–495.
- [76] Toffoli, A.; Onorato, M.; Monbaliu, J. Wave statistics in unimodal and bimodal seas from a second-order model. *Eur. J. Mech. B/Fluids* **2006**, 25, 649–661.
- [77] Lopez, G.; Conley, D. Comparison of HF Radar fields of directional wave spectra against *in situ* measurements at multiple locations. *J. Mar. Sci. Eng.* **2019**, 7, 271.
- [78] Saulnier, JB.; Maisondieu, C.; Ashton, I.; Smith, G.H. Refined sea state analysis from an array of four identical directional buoys deployed off the Northern Cornish coast (UK). *Applied Ocean Research*, **2012**, 37, 1–21.
- [79] Barrick, D. and Lipa, B. When are HF-radar observed wave heights modulated by periodic tidal and inertial currents?, IEEE/OES Eleventh Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM), **2015**, 1-4
- [80] Alfonso, M.; Álvarez-Fanjul, E.; López, J.D. Comparison of CODAR SeaSonde HF radar Operational Waves and Currents Measurements with Puertos Del Estado Buoys. Final Report. Puertos Del Estado, Ministerio de fomento. Madrid, Spain. March 2006.
- [81] Ramos, R.J., Graber, H.C. and Haus, B.K. Observation of Wave Energy Evolution in Coastal Areas Using HF Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2009**, 26.9, 1891-1909.
- [82] Wyatt, L. Wave and tidal power measurement using HF radar. *International Marine Energy Journal* **2018**, 1(2-Nov), 123-127.

- [83] Mundaca-Moraga, V.; Abarca-del-Rio, R.; Figueroa, D.; Morales, J. A Preliminary Study of Wave Energy Resource Using an HF Marine Radar, Application to an Eastern Southern Pacific Location: Advantages and Opportunities. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 203.
- [84] Mason, E.; Coombs, S.; Oliveira, P. B. An overview of the literature concerning the oceanography of the eastern North Atlantic region. *Relat. Cient. Téc* **2006**, *33*, 58. IPIMAR, Série digital (<http://ipimar-iniap.ipimar.pt>)
- [85] Ruiz, M.; Cabanas, J.M; González-Nuevo, G.; Bode, A.; Nogueira, E.; González-Pola, C. y Lavín, A. Capítulo 1. Clima y meteorología. *El Cambio climático y oceanográfico en el Atlántico del norte de España*. Publisher IEO 2012. Editors: Antonio Bode, Alicia Lavín, Luis Valdés.
- [86] Varela, R.A.; Rosón, G.; Herrera, J.L.; Torres-López, S.; Fernández-Romero, A. A general view of the hydrographic and dynamical patterns of the Rías Baixas adjacent sea area. *Journal of Marine Systems* **2005**, *54* (1–4), 97–113, ISSN 0924-7963
- [87] Dodet, G.; Bertin, X.; Taborda, R. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades, *Ocean Modelling* **2010**, *31* (3–4), 120–131, ISSN 1463-5003.
- [88] Martínez-Asensio, A.; Tsimplis, M. N.; Marcos, M.; Feng, X.; Gomis, D.; Jordá, G. and Josey, S. A. Response of the North Atlantic Wave Climate to Atmospheric Modes of Variability. *International Journal of Climatology* **2016**, *36* 1210–1225.
- [89] Harrison, G. P. and Wallace, A. R. Sensitivity of wave energy to climate change, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *20* (4) 870–877, December, 2005.
- [90] Reguero, B.G.; Losada, I.J. and Méndez, F.J. A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nat Commun* **2019**, *10*, 205.

- [91] Gillett, N.P.; Graf, H.F. and Osborn, T.J. Climate Change and the North Atlantic Oscillation. In *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. Eds. J.W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen and M. Visbeck. 2003
- [92] Mackay, E.B.L.; Bahaj, A.S.; Challenor, P.G. Uncertainty in wave energy resource assessment. Part 2: Historic data. *Renewable Energy* **2010**, 35 (8) 1809-1819, ISSN 0960-1481
- [93] Rousi, E.; Rust, H.W.; Ulbrich, U.; Anagnostopoulou, C. Implications of Winter NAO Flavors on Present and Future European Climate. *Climate* **2020**, 8, 13.
- [94] Ondas. Una Introducción a la Oceanografía física. Disponible online (<http://www.physocean.icm.csic.es/Intro0c/lecture09-es.html>)
- [95] Kinsman, B. Book: Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface. Dover Publications. Mineola, New York. 1984. Originally published: Englewood Cliffs. New Jersey. USA 1965.
- [96] Holthuijsen, L. Description of ocean waves. In *Waves in Oceanic and Coastal Waters* **2007** (pp. 24-55). Cambridge: Cambridge University Press.
- [97] Organización Meteorológica mundial (WMO). Guía Para el análisis y pronóstico de las olas **2018**. Report No. 702.
- [98] Tucker, M. J. Analysis of records of sea waves. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers* **1963**, 262:2, 305-316.
- [99] CODAR. Ocean Sensors SeaSonde® Remote Unit System Specification. Versión 6, revision 06/2017. Disponible online: https://www.codar.com/images/products/SeaSonde/1B-CODARspec_SSRS-100_v6-20170609.pdf (consultado el 20 enero 2020).

- [100] CODAR. The Unique Nature of HF radar. Disponible online: http://www.codar.com/intro_hf_radar.shtml (consultado 16 marzo 2021).
- [101] CODAR. Configuration File Formats. Disponible online: <http://support.codar.com/> (consultado el 20 enero 2020).
- [102] Lipa, B.; Nyden, B.; Barrick, D.; Kohut, J. HF Radar Sea-echo from Shallow Water. *Sensors* **2008**, 8, 4611-4635.
- [103] Copernicus Marine *in Situ* Team. 2017. Copernicus *in Situ* TAC, Real Time Quality Control for WAVES. Toulouse, France, **2017**, 1-9.
- [104] The Specialist Committee on Waves Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC. Proceeding of the 23 rd ITTC, Volume II. Venice Italy, September 8-14, 2002.
- [105] Perez-Collazo, C.; Greaves, D.; Iglesias, G. A Novel Hybrid Wind-Wave Energy Converter for Jacket-Frame Substructures. *Energies* **2018**, 11, 637.
- [106] Carballo, R.; Sánchez, M.; Ramos, V.; Fragueta, J.A.; Iglesias, G. The intra-annual variability in the performance of wave energy converters: A comparative study in N Galicia (Spain). *Energy* **2015**, 82, 138-146, ISSN 0360-5442
- [107] Puertos del Estado. Conjunto de Datos SIMAR. Disponible online: http://calipso.puertos.es/BD/informes/INT_8.pdf (consultado el 20 enero 2020).
- [108] CODAR. Ocean Sensors SeaSonde® News Letter **2005**. Disponible online: http://www.codar.com/images/news/Newsletter_0905.pdf (consultado el 20 enero 2020).
- [109] Teague, C.; Vesecky, J.; Fernandez, D. HF Radar instruments, past to present. *Oceanography* **1997**, 10-2, 40-44.

- [110] Atan, R.; Goggins, J.; Hartnett, M.; Nash, S.; Agostinho, P. Assessment of Extreme Wave Height Events in Galway Bay Using High Frequency Radar (CODAR) Data. In Proceedings of the 1st International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW), Lisbon, Portugal, 24–26 November, 2014.
- [111] Iglesias, G.; López, M.; Carballo, R.; Castro, A.; Fragueta, J.A.; Frigaard, P. Wave energy potential in Galicia (NW Spain). *Renewable Energy* **2009**, *34* (11), 2323-2333, ISSN 0960-1481
- [112] CODAR. Radar Training. Disponible online http://support.codar.com/Technicians_Information_Page_for_SeaSondes/Training_Files/12.Day3_SeaSonde_WavesIntro.pdf (accessed on 20 January 2020).
- [113] Memoria Actividades 2011, Intecmar. Disponible online: <http://www.intecmar.gal/PDFs/Memoria/INTECMAR.%20MEMORIA%20DE%20ACTIVIDADES%202011.pdf> (consultado el 20 enero 2020).
- [114] Puertos del Estado. Red de boyas de aguas profundas. Informe de datos de la boya de Villano-Sisargas. Periodo: Dic.2016 – Nov.2017. Disponible online: <https://bancodatos.puertos.es//BD/informes/anuales/2/2246I17.pdf> (consultado el 20 enero 2020).
- [115] Puertos del Estado. Red de boyas de aguas profundas. Informe de datos de la boya de Silleiro: Dic.2016 – Nov.2017. Disponible online: <https://bancodatos.puertos.es//BD/informes/anuales/2/2246I17.pdf> (consultado el 20 enero 2020).
- [116] Fugro. SeaWath metocean buoys and sensors. Disponible online: <https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/technology/seawatch-metocean-buoys-and-sensors> (consultado el 20 enero 2020).

- [117] Puertos del Estado. Conjunto de datos REDEXT. Disponible online http://calipso.puertos.es/BD/informes/INT_REDEXT.pdf (consultado el 20 enero 2020).
- [118] Meteogalicia. Histórico de la Red Meteorológica. Disponible online: <https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacionshistorico/historico.action?idEst=10800> (Consultado el 20 de enero 2020).





Listado de publicaciones

Forman parte del contenido de esta Tesis los siguientes artículos:

- Basañez, A.; Lorente, P.; Montero, P.; Álvarez-Fanjul, E.; Pérez-Muñuzuri, V. Quality Assessment and Practical Interpretation of the Wave Parameters Estimated by HF Radars in NW Spain. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 598. Editorial MDPI, ISSN: 2072-4292. En 2019, factor impacto 4.509 y posición en su categoría Q2.
- Basañez, A.; Pérez-Muñuzuri, V. HF Radars for Wave Energy Resource Assessment Offshore NW Spain. *Remote Sens.* **2021**, *13* (11), 2070. Editorial MDPI, ISSN: 2072-4292. En 2019, factor impacto 4.509 y posición en su categoría Q2.

Declaro ser la autora principal de los dos artículos y que no ha participado ningún coautor no doctor. Mi contribución en ambos incluyó la investigación, el diseño y desarrollo de la metodología, la generación de las tablas y gráficas de resultados y la escritura de los manuscritos originales. Declaro estar autorizada para la utilización de su contenido, por ser publicaciones de acceso abierto como se puede ver en el siguiente enlace: <https://www.mdpi.com/about/openaccess>.

Se ha participado como coautora en los siguientes artículos, que no han formado parte del contenido original de esta Tesis:

- Lorente, P.; Sotillo, M.G.; Aouf, L.; Amo-Baladrón, A.; Barrera, E.; Dalphinnet, A.; Toledano, C.; Rainaud, R.; De Alfonso, M.; Piedracoba, S.; Basañez, A.; García-Valdecasas, J.M.; Pérez-Muñuzuri, V.; Álvarez-Fanjul, E. Extreme Wave Height Events in NW Spain: A Combined Multi-Sensor and Model Approach. *Remote Sens.* **2018**, 10, 1.
- Lorente, P.; Basañez Mercader, A.; Piedracoba, S.; Pérez-Muñuzuri, V.; Montero, P.; Sotillo, M.G.; Álvarez-Fanjul, E. Long-term skill assessment of SeaSonde radar-derived wave parameters in the Galician coast (NW Spain). *Int. J. Remote Sens.* **2019**, 10, 9208–9236.

